

VŠB- Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. Martin Sikora

VŠB- Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Diagnostika vybraného elektrického stroje

Diagnostic of Selected Electrical Machine

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Sikora

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Diagnostika vybraného elektrického stroje
Diagnostic of Selected Electrical Machine

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor činnosti stroje, základní princip, konstrukce
3. Rozbor použitých diagnostických metod točivého stroje
4. Proved'te diagnostiku vybraného točivého stroje, měření popište
5. Vyhodno'te zjištěná měření a posud'te aktuální stav stroje
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení, 2008, Praha, BEN
- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

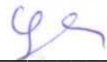


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7.5.2015

Bc. Martin Sikora v.r.: 



Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval panu Ing. Janu Wiszczorovi za vstřícný přístup při měření a za poskytnutí některých zásadních podkladů pro zpracování této diplomové práce. Na tomto místě také děkuji panu Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za cenné připomínky. Rovněž bych chtěl poděkovat všem pedagogickým pracovníkům Vysoké školy báňské, kteří mi předali teoretické znalosti potřebné pro zpracování této práce i pro další život.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické osoby

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, ods. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v navazujících magisterských programech VŠB- TU Ostrava.

V Třinci dne 4.5. 2015

PZF - silnoproudá zařízení ⑥
 ENERGETIKA TŘINEC, a.s.
Razítko firmy a podpis: 

Abstrakt

Tato diplomová práce zpracovává problematiku diagnostických měření a zkoušení elektrických synchronních strojů. Jsou zde shrnuty všechny používané metody diagnostiky izolačních systémů, magnetických obvodů a diagnostika vibrací. Praktická část práce zpracovává na příkladu konkrétního elektrického stroje diagnostické měření a vyhodnocení výsledků. Dále je zpracováno řešení problémů a doporučení ke zlepšení diagnostiky na stroji.

Klíčová slova

Synchronní stroj, hladký rotor, rotor s vyniklými póly, amortizér, profylaktika izolačního systému, izolační odpor, ztrátový činitel $\tan\delta$, polarizační index, částečné výboje, podélná reaktance, příčná reaktance, spektrum vibrací, spektrum rozběhového proudu.

Abstract

This thesis elaborates the problematic of diagnostic measurement and testing of electrical synchronous machines. There are summarized all used methods for diagnostics of insulation systems, magnetic circuits and vibration diagnostics. The practical part elaborates diagnostic measurement and evaluation of results on the example of electrical machine. Further there's elaboration of troubleshooting and recommendations for improving the diagnosis of the machine.

Key words

Synchronous machine, plain rotor, salient pole rotor, damper winding, prophylactics of insulation system, insulation resistance, loss factor $\tan\delta$, polarization index, partial discharges, d- axis reactance, q- axis reactance, the vibration spectrum, spectrum of start- up current.

Seznam použitých symbolů a zkratek

| Ozn. | Jednotka | Popis |
|-----------|------------|---|
| C | [μ F] | Kapacita obecně |
| c | [-] | Počet valivých elementů ložiska |
| d_s | [mm] | Průměr roztečné kružnice valivých elementů ložiska |
| d_0 | [mm] | Průměr valivého elementu ložiska |
| FFT | | Fast Fourier Transformation- Rychlá Fourierova transformace |
| f | [Hz] | Frekvence |
| f_s | [Hz] | Síťová frekvence |
| f_{ot} | [Hz] | Otáčková frekvence |
| f_{ot}' | [Hz] | Otáčková frekvence redukována na výstup převodovky |
| f_m | [Hz] | Otáčková frekvence motoru |
| f_k | [Hz] | Otáčková frekvence kompresoru |
| I | [A] | Proud obecně |
| I_R | [A] | Reálná složka proudu |
| I_C | [A] | Kapacitní složka proudu |
| I_{C0} | [A] | Kapacitní proud ideálního dielektrika |
| I'_C | [A] | Kapacitní (jalová) složka absorpčního proudu |
| I_a | [A] | Absorbční proud vyvolaný pomalými polarizacemi |
| I_w | [A] | Činná složka absorpčního proudu |
| I_v | [A] | Vodivostní proud |
| i | [-] | Převodový poměr převodovky |
| K_{Ai} | [-] | Korekční koeficient i- tého pásma pro váhový filtr A |
| L_A | [dB] | Hladina akustického tlaku s váhovým filtrem A |
| L_i | [dB] | Akustický tlak i- tého pásma |

| | | |
|---------------------|-----------------------|--|
| M | [Nm] | Moment |
| M_s | [Nm] | Synchronní moment |
| M_r | [Nm] | Reakční moment |
| M_{\max} | [Nm] | Moment zvratu |
| M_n | [Nm] | Jmenovitý moment |
| m | [-] | Počet fází sítě |
| n | [min ⁻¹] | Otáčky |
| n_1 | [min ⁻¹] | Otáčky na vstupu do převodovky |
| n_2 | [min ⁻¹] | Otáčky na výstupu převodovky |
| p | [-] | Počet pólů na fázi |
| p_{iz60} | [-] | Jednominutový polarizační index |
| p_{iz600} | [-] | Desetiminutový polarizační index |
| Q | [-] | Počet drážek |
| q | [-] | Počet drážek na pól a fázi |
| q_{id} | [pC] | Zdánlivý náboj částečného výboje v dané drážce |
| q_i | [pC] | zdánlivý náboj částečného výboje v i-té drážce |
| R | [Ω] | Odpor obecně |
| R_{iz15} | [Ω] | Izolační odpor v čase 15s (hodnota v indexu představuje čas) |
| $tg\delta_{0,6U_n}$ | [-] | Ztrátový činitel pro 60% U_n (hodnota v indexu představuje poměrné napětí) |
| U_n | [V] | Jmenovité napětí stroje |
| U | [V] | Napětí obecně |
| v | [mm.s ⁻¹] | Rychlost vibrací |
| VPI | | Vacuum Pressure Impregnation- Technologie vákuové impregnace |
| X_δ | [Ω] | Rozptylová reaktance |
| X_d | [Ω] | Podélná reaktance |
| X_q | [Ω] | Příčná reaktance |

| | | |
|-----------------------------|------------------------|---|
| α | [rad] | Úhel |
| β | [°] | Zátěžný úhel |
| β | [rad] | Zátěžný úhel |
| β_n | [rad] | Jmenovitý zátěžný úhel |
| β_{\max} | [rad] | Zátěžný úhel v bodě zvratu |
| $\Delta\Theta_{\text{dov}}$ | [K] | Dovolené oteplení izolace |
| Θ_0 | [°C] | Teplota okolí |
| Θ_{dov} | [°C] | Dovolená teplota izolace |
| τ_{600} | [-] | Desetiminutová časová konstanta vinutí |
| ω | [rad.s ⁻¹] | Úhlová frekvence |
| 2p | [-] | Počet pólpárů (pólových dvojic na fázi) |

Obsah

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Úvod | 13 |
| 2. | Popis společnosti Energetika Třinec a.s. | 14 |
| 3. | Teoretický rozbor činnosti stroje..... | 17 |
| 3.1. | Základní princip činnosti synchronního stroje | 17 |
| 3.1.1. | Moment stroje s hladkým rotorem | 18 |
| 3.1.2. | Moment stroje s vyniklými póly..... | 19 |
| 3.1.3. | Reluktanční motory | 20 |
| 3.1.4. | Amortizér a kruhy nakrátko..... | 22 |
| 3.1.5. | Regulace buzení | 22 |
| 3.1.6. | Spouštění synchronního motoru | 23 |
| 3.2. | Konstrukce synchronního stroje | 25 |
| 3.2.1. | Provedení a konstrukce statoru..... | 25 |
| 3.2.2. | Provedení vinutí a konstrukce rotoru | 26 |
| 3.2.3. | Materiály magnetického obvodu | 28 |
| 3.2.4. | Materiály izolace | 29 |
| 3.2.5. | Sběrací ústrojí..... | 31 |
| 4. | Rozbor diagnostických metod | 32 |
| 4.1. | Vizuální kontrola stroje | 35 |
| 4.1.1. | Vizuální kontrola statoru | 35 |
| 4.1.2. | Vizuální kontrola rotoru | 36 |
| 4.2. | Diagnostika na izolačním systému | 37 |
| 4.2.1. | Izolační odpor a polarizační index statorového vinutí..... | 38 |
| 4.2.2. | Izolační odpor polarizační index rotorového vinutí | 40 |
| 4.2.3. | Napěťová závislost izolačního odporu vinutí..... | 41 |
| 4.2.4. | Ztrátový činitele tgδ, kapacita a časová konstanta vinutí | 41 |
| 4.2.5. | Měření částečných výbojů galvanickou metodou | 43 |
| 4.2.6. | Měření částečných výbojů akustickou sondou | 44 |
| 4.3. | Diagnostika vibrací..... | 45 |
| 4.3.1. | Nesouosost..... | 46 |
| 4.3.2. | Mechanické uvolnění | 48 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.3.3. | Rezonance | 50 |
| 4.3.4. | Poruchy ložisek | 51 |
| 4.3.5. | Elektrické poruchy | 52 |
| 4.4. | Měření hluku | 53 |
| 4.5. | Diagnostika magnetického obvodu | 54 |
| 4.5.1. | Magnetizační zkouška | 54 |
| 5. | Realizace diagnostického měření | 55 |
| 5.1. | Offline diagnostika | 56 |
| 5.1.1. | Vizuální prohlídka | 56 |
| 5.1.2. | Odpor vinutí | 57 |
| 5.1.3. | Kapacita vinutí a izolační odpor statorového vinutí | 58 |
| 5.1.4. | Izolační odpor rotorového vinutí | 59 |
| 5.1.5. | Polarizační index | 59 |
| 5.1.6. | Měření rázovou vlnou | 60 |
| 5.2. | Online diagnostika při chodu | 62 |
| 5.2.1. | Diagnostika vibrací: | 63 |
| 5.3. | Online diagnostika při rozběhu | 67 |
| 6. | Vyhodnocení měření | 69 |
| 7. | Doporučení | 70 |
| 8. | Závěr | 71 |
| | Seznam obrázků | 72 |
| | Seznam tabulek | 73 |
| | Rejstřík | 74 |
| | Použitá literatura | 75 |

1. Úvod

Všechny elektrické stroje podléhají degradačním procesům, které postupem času nejen zhoršují provozní parametry stroje, ale především zvyšují riziko havárie. Zvýšené riziko poruch výrazně snižuje provozní spolehlivost nejen samotného stroje ale spolu s ním i celého technologického celku a všech navazujících a závislých zařízení. V případě rozsáhlejšího provozu, kde za daný stroj není možný záskok, nebo není možno stroj v krátkém čase vyměnit je potřeba znát aktuální stav stroje a případné potenciální problémy je potřeba indikovat již počátku.

Technická diagnostika elektrických strojů slouží právě ke zjištění stavu stroje a k detekci počínajících problémů dříve, než způsobí takovou poruchu, která by vyžadovala odstávku.

Díky možnosti zjistit míru degradace různých součástí stroje je zároveň kromě indikace problému možno dílčími opravami narušených součástí prodloužit celkovou životnost stroje jako celku. Při pravidelných údržbách a opravách je dnes mnohdy možno životnost stroje prodloužit tak, že fyzická životnost je delší, než životnost morální.

V neposlední řadě jsou některé diagnostické prohlídky a měření předepsány normami jako povinné, protože zabezpečují ochranu osob a majetku, především však ochranu před úrazem elektrickým proudem a požární ochranu.

Z výše uvedeného vyplývá, že základní diagnostika musí být provedena alespoň v rámci revize u každého stroje. Pokud však hovoříme o obsáhlejší diagnostice, je zásadním kritériem pro její provádění ekonomická výhodnost. Provádět obsáhlou a především drahou diagnostiku u stroje, který není z hlediska provozu zásadní, popřípadě jeli možno tento stroj vyměnit s krátkou odstávkou, je z ekonomického hlediska zbytečné. Oproti tomu stroj, který není továrně vyráběn, není možno při poruše v krátké době nahradit, proto je jedinou možností zajištění maximální možné spolehlivosti

2. Popis společnosti Energetika Třinec a.s.

Hlavní činnost akciové společnosti spočívá ve výrobě, distribuci a prodeji elektrické energie, horké vody, technologické páry, dmýchaného a stlačeného vzduchu, průmyslové, koupelenské a pitné vody, v distribuci zemního plynu a dále v distribuci a úpravě topných plynů získávaných jako vedlejší produkt při hutní výrobě. Společnost provozuje rovněž ústřední sklad topných olejů, rozmrazovnu uhlí, kanalizační řády a čistírny odpadních vod. Společnost zásobuje energiemi nejen mateřský podnik TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., ale i další společnosti a komunální sféru. [22]

ENERGETIKU TŘINEC, a.s. tvoří tyto útvary:

- Provoz tepelné energetiky
- Provoz tepláren
- Řídící odborné útvary

Provoz tepelná energetika tvoří střediska

- vodní a vzduchové
- plynové
- tepelné

Vodní a vzduchové hospodářství

Středisko vodního hospodářství provozuje pět vodáren, které dodávají provozní vodu pro technologické potřeby TŽ. Voda je odebírána ze dvou nezávislých zdrojů, a to z toku řeky Olše a přiváděčem z Těrlické přehrady. Středisko zajišťuje pro celý areál TŽ rovněž dodávku pitné a koupelenské vody. Pitná voda je nakupována od SmVaK, koupelenská voda je upravována v TŽ. Středisko vodního hospodářství provozuje kanalizační řády odpadních a splaškových vod. [22]

Středisko vzduchového hospodářství zajišťuje výrobu a dodávku stlačeného vzduchu pro TŽ v průměrném množství 50 000 m³/h. [22]

Plynové hospodářství

Středisko plynového hospodářství zajišťuje distribuci, úpravu a skladování topných plynů vyráběných na agregátech TŽ, tj. vysokopecního, koksárenského a konvertorového plynu. Zároveň zajišťuje nákup a distribuci zemního plynu. Směsné stanice topných plynů zabezpečují míchání hutních topných plynů pro zásobování TŽ, především válcoven. Řízení plynové sítě zabezpečuje plynový dispečink ET. [22]

Tepelné hospodářství

Tepelné hospodářství zajišťuje skladování topných olejů na ústředním skladu topných olejů včetně distribuce topných olejů všem odběratelům v areálu TŽ. Má kapacitu 34 000 m³ a je vybaven čističkou odpadních vod. Úsek horkovodu zabezpečuje dodávky tepla v horké vodě odebírané z tepláren E2 a E3 pro celý areál TŽ i město Třinec a okolí v ročním objemu cca 1 600 TJ. Tento úsek provozuje více než 440 výměníkových a 160 regulačních stanic tepla, jejichž prostřednictvím je zabezpečena komplexní dodávka tepla od výrobce až po konečného odběratele. Úsek rozmrazovny zajišťuje v zimním období rozmrazování uhlí pro teplárnu E3 a koksovnu i aglomeraci TŽ. [22]

Provoz teplárny má čtyři střediska, která zabezpečují výrobu a distribuci elektrické energie, dmýchaného vzduchu, technologické páry a výrobu horké vody a stlačeného vzduchu. [22]

Středisko teplárna E2 vyrábí vysokotlakou páru na čtyřech kotlích Celkový instalovaný tepelný výkon je ve výši 235,75 MWt. Palivem jsou hutní topné plyny (vysokopecní, koksárenský a konvertorový) a zemní plyn. Elektrická energie je na teplárně E2 vyráběna na dvou turbogenerátorech o celkovém instalovaném výkonu 39,5 MWe. Toto středisko zajišťuje distribuci technologické středotlaké páry v areálu TŽ. Stlačený vzduch do sítě TŽ a pro výrobu technických plynů společnosti Linde Gas je dodáván třemi parními turbokompresory o výkonu 3 × 30 000 m³ n/h. Stroje jsou vybaveny parními odběry pro výrobu horké vody. [22]

Na středisku teplárna E3 Celkový instalovaný tepelný výkon je 347 MWt. Palivem je černé energetické uhlí, hnědé uhlí, proplástek a přebytky hutních plynů. Elektrická energie je vyráběna na čtyřech turbogenerátorech o celkovém instalovaném výkonu 62 MWe. [22]

Středisko elektrorozvodu zajišťuje distribuci vlastní a nakoupené elektrické energie v rámci provozu lokální distribuční soustavy jak pro vlastní spotřebu ET, tak pro dodávku elektřiny všem odběratelům v areálu třinecké hutě i v nejbližším okolí. Nákup elektřiny je realizován přes 3 vysokonapěťové rozvodny s celkovým přenosovým výkonem 303 MVA. [22]

Chemická úprava vod

Středisko chemické úpravy vody zabezpečuje zásobování tepláren a TŽ upravenou napájecí a chladicí vodou s celkovou výrobní kapacitou 240 t/h demineralizované vody. [22]

Řídící odborné útvary

jsou dle svého převažujícího zaměření členěné na útvary:

- finanční a obchodní úsek
- technický úsek
- odbor strategie

Finanční a obchodní úsek

zajišťuje bilancování paliv a energií ET a TŽ, realizuje ekonomické řízení (finanční plány, účetnictví, rozbory, palivoenergetická strategie) a obchodní činnost společnosti. [22]

Technický úsek

je zaměřen na perspektivní rozvoj, technické služby, přípravu, koordinaci a realizaci oprav, rekonstrukcí a modernizací, investiční výstavbu. Provozuje technologickou informační síť včetně péče a modernizace sítě LAN PC. [22]

Strategie

zabezpečuje strategii společnosti, tvorbu systémů řízení na úseku ochrany životního prostředí, koordinuje činnost na úseku prevence závažných havárií. [22]

3. Teoretický rozbor činnosti stroje

3.1. Základní princip činnosti synchronního stroje

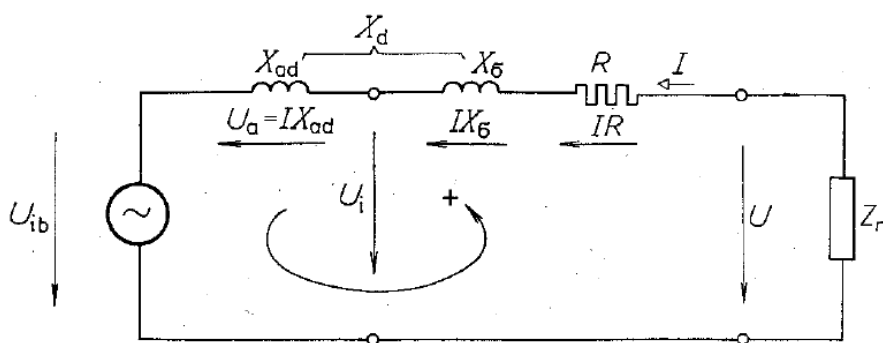
Koncept synchronního stroje je jedním z nejstarších v elektrických strojích. Otáčky synchronního stroje jsou přímo úměrné frekvenci sítě. Magnetické pole statoru se otáčí stejně rychle, jako se fyzicky otáčí rotor. Mění se pouze zátěžný úhel β , který představuje elektrický úhel mezi osou magnetického pole statoru a osou zubu rotoru popřípadě osu magnetického buzení hladkého rotoru.

Na statoru synchronního stroje je v drážkách navinuto třífázové (ale může být i vícefázové) vinutí. Při použití standardního evropského průmyslového kmitočtu 50 Hz jsou otáčky stroje dány počtem pólů právě statorového vinutí. Pro otáčky platí:

$$n = \frac{60 f}{2p} \quad (1)$$

Statorové vinutí je navinuto v drážkách rotorového paketu složeného z dynamoplechů, protože statorem teče časově proměnlivý magnetický tok. Díky paketu z tenkých izolovaných plechů se nemohou v celém objemu materiálu uzavírat vířivé proudy a tím se výrazně snižují ztráty v železe.

Synchronní stroje se podle konstrukce rotoru dělí na stroje s viníklými póly a na stroje s hladkým rotorem (nebo též stroje s konstantní vzduchovou mezerou). Na rotoru se nachází budící vinutí, jehož úlohou je zabezpečit požadovaný magnetický tok přes jeho statoru, tak aby toto rotující magnetické pole mohlo buďto indukovat ve statorovém vinutí napětí v generátoru, anebo aby mohlo interakci s magnetickým polem statoru vytvářet hnací moment motoru. Rotor synchronních strojů může být vyroben z jednoho kompaktního kusu materiálu, protože jím teče stejnosměrný magnetický tok, který nezpůsobuje vířivé proudy. Rotory s viníklými póly se provádí montované z jednotlivých částí, hladké rotory se vyrábí z jednoho kompaktního kusu strojně opracovaného výkovku.



Obr. 1 Náhradní schéma synchronního stroje [6]

Moment synchronního stroje je tvořen dvěma složkami, a sice synchronním momentem, který je vyvolán magnetickým polem rotoru a reakčním momentem, který je vyvolán rozdílnou podélnou a příčnou reaktancí. Obecně je dán moment synchronního stroje součtem těchto složek[6]:

$$M = M_s + M_r = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_\delta} \sin \beta + 9,55 \frac{m}{n_s} U^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \quad (2)$$

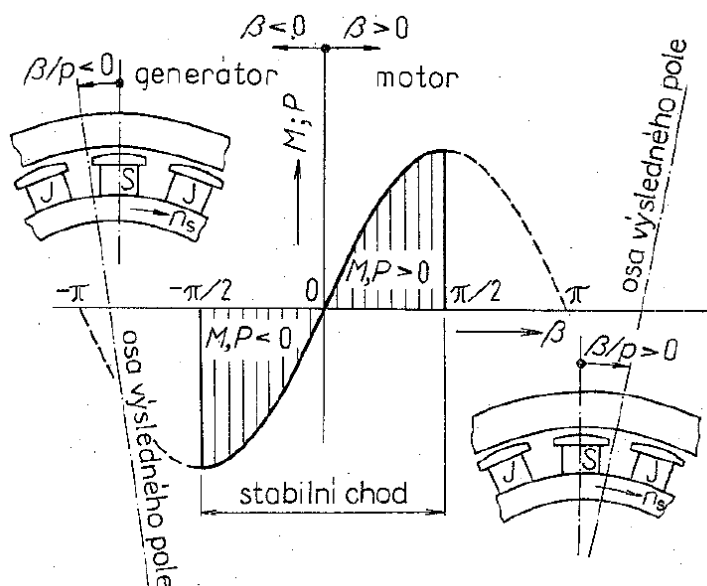
Momentová charakteristika synchronního stroje je rozdílná pro stroj s hladkým rotorem a stroj s vyniklými póly. Tento rozdíl je daný rozdílným chováním reakčního momentu stroje při zatížení.

3.1.1. Moment stroje s hladkým rotorem

Reakční moment synchronního stroje s hladkým rotorem je v celém rozsahu zátěžného úhlu β nulový, protože podélná a příčná reaktance jsou u hladkého rotoru stejné. Toto chování je dáno konstantní vzduchovou mezerou po obvodu rotou, tedy tím, že v ose magnetického toku buzení rotoru jsou vlastnosti magnetického obvodu stejné, jako v ose mezi magnetickými póly rotoru. Pro reakční moment stroje s hladkým rotorem tedy platí [6]:

$$M_r \approx X_d - X_q = 0 \quad (3)$$

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_\delta} \sin \beta \quad (4)$$



Obr. 2 Moment synchronního stroje s hladkým rotorem [6]

Stroj s hladkým rotorem tedy pracuje stabilně v oblasti od $\beta = -\frac{\pi}{2}$ do $\beta = \frac{\pi}{2}$. Jelikož je průběh momentu sinusový, lze jednoduše určit momentovou přetížitelnost, tedy bod, kdy se stroj dostane na mez statické stability a hrozí vypadnutí ze synchronizmu:

$$\frac{M_{max}}{\sin \beta_{max}} = \frac{M_n}{\sin \beta_n} \quad (5)$$

$$\beta_{max} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \beta_{max} = 1 \quad (6)$$

Pro výpočet momentové přetížitelnosti můžeme tedy napsat [6]:

$$\frac{M_{max}}{M_n} = \frac{1}{\sin \beta_n} \quad (7)$$

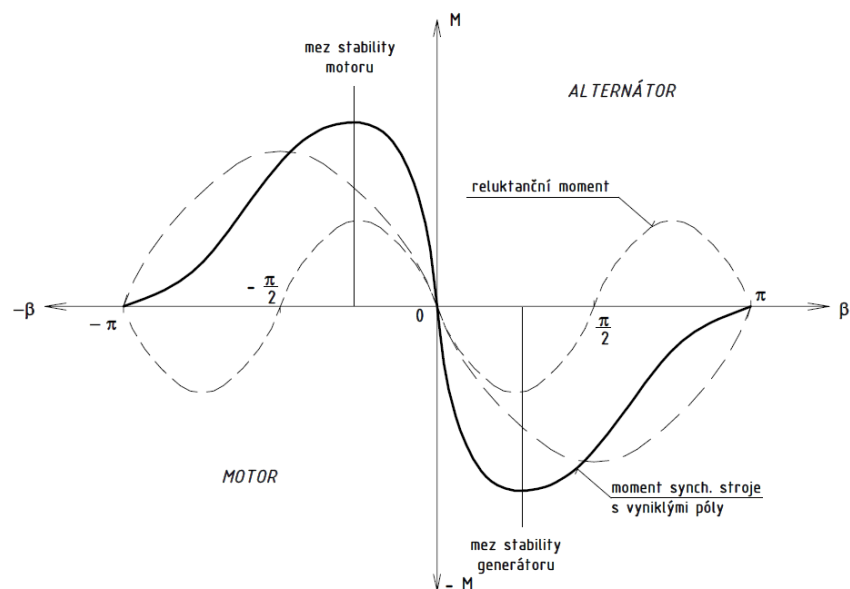
3.1.2. Moment stroje s vyniklými póly

Moment synchronního stroje s vyniklými póly je daný rozdílem synchronního momentu a reakčního momentu stroje. Vzduchová mezera není po celém obvodu stroje konstantní, což způsobuje rozdílnou podélnou a příčnou reaktanci. Vzduchová mezera je zvětšena kvůli dělicí mezeře mezi vyniklými póly, ale také kvůli záměrně vytvořené nehomogenně magnetického pole po obvodu zubu kvůli vytvoření sinusového průběhu magnetického pole po obvodu rotoru. Rozdíl podélné a příčné reaktance způsobuje nenulový reakční moment, který deformuje momentovou charakteristiku stroje s vyniklými póly. Tento reakční moment je druhou harmonickou synchronního momentu.

Působí-li tedy oba současně, deformuje momentovou charakteristiku a posouvá moment zvratu na hodnotu menší než u stroje s hladkým rotorem. Bod zvratu, který vymezuje oblast stabilního chodu stroje, je sice při menším momentu, ale moment zvratu má větší hodnotu, než u odpovídajícího stroje s hladkým rotorem. Pro určení jeho hodnoty je však potřeba znát hodnotu podélné a příčné reaktance.

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_\delta} \sin \beta + 9,55 \frac{m}{n_s} U^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \quad (8)$$

Momentová charakteristika stroje s vyniklými póly je dána součtem synchronního a reakčního momentu:

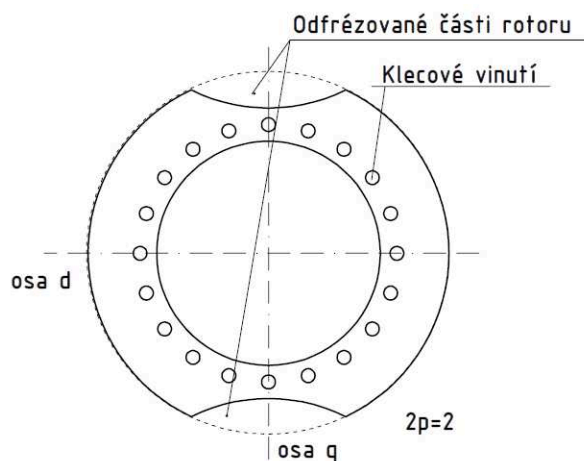


Obr. 3 Moment synchronního stroje s vyniklými póly [13]

3.1.3. Reluktanční motory

Speciální provedení synchronních strojů s vyniklými póly je jako reluktanční motor (ve starší literatuře bývají označovány jako reakční synchronní motory). U reluktančních motorů se využívá reakčního momentu bez vlivu synchronního momentu. Tyto motory nemají provedeno budící vinutí, proto jejich moment nemá synchronní složku. Rotor reluktančního motoru je konstruován tak, aby byl rozdíl podélné a příčné reaktance čím jak možná největší, čímž je zajištěna reakční složka momentu. Takovéto motory se používají pro malé výkony v servomechanizmech nebo pro výkony v řádu jednotek kilowattů pro motory s vysokou účinností.

Rotor reluktančního motoru lze jednoduše vyrobit odfrézováním částí rotoru asynchronního motoru odpovídajícím počtu pólů statorového vinutí. Na Obr. 4 je příklad vytvoření dvoupólového reluktančního rotoru. Původní klec rotoru plní svou funkci pro asynchronní rozběh motoru a zároveň jako amortizér působí proti kývání rotoru při dynamických změnách zatížení.



Obr. 4 Reluktanční rotor vyrobený z rotoru asynchronního stroje [13]

Na Obr. 5 je zobrazen rotor synchronního reluktančního motoru o výkonu 7,5 kW určený pro pohon čerpadel. Tento rotor oproti předešlému nemá klec nakrátko, proto není schopen se rozběhnout při připojení k síti. Tento typ motoru se proto používá výhradně ve spojení s frekvenčním měničem, který zajistí rozběh změnou frekvence. Důvodem použití reluktančního motoru pro takovýto pohon je vyšší účinnost, která podle výrobce dosahuje hodnoty 92,1% oproti konvenčnímu asynchronnímu motoru s účinností 88,2% (motor třídy účinnosti IE2).



Obr. 5 Provedení rotoru čtyřpólového reluktančního motoru čerpadla s účinností IE4 [12]

3.1.4. Amortizér a kruhy nakrátko

Při skokových změnách zátěže stroje se dynamicky mění v závislosti na momentu setrvačnosti rotoru zátěžný úhel β . Odezva zátěžného úhlu na skokové změny však není skoková, ale má podobu tlumených kmitů. Aby byly tyto kmity, jinak nazývané také kývání rotoru, čím jak nejvíce tlumeny, používá se na pólových nástavcích rotoru tzv. amortizér. Jedná se o tyče v pólovém nástavci, spojené na čelech pólu nakrátko. Změny magnetického toku při zákmitech zátěžného úhlu indukují proud, který rekčním polem působí proti těmto změnám, čímž tyto kmity tlumí. Pokud jsou amortizéry jednotlivých pólových nástavců spojeny mezi sebou kruhy nakrátko, je tím vytvořena celá rotorová klec nakrátko, kterou lze využít pro rozběh motoru v asynchronním režimu.



Obr. 6 Amortizéry stroje s vyniklými póly a spojení amortizérů kruhy nakrátko [14;15]

3.1.5. Regulace buzení

Regulace buzení synchronních strojů se provádí v závislosti na požadovaném provozním stavu stroje a na provozním režimu. V motorickém režimu buzení ovlivňuje účinník stroje. Podbuzený motor má induktivní charakter; naopak přebuzený motor vykazuje kapacitní charakter, čehož se využívá například pro synchronní rotační kompenzátory $\cos\phi$. Buzení rovněž ovlivňuje synchronní složku momentu, což lze využít například pro zvýšení statické přetížitelnosti (viz část 3.1).

V generátorickém režimu je na buzení závislý nejen účinník, ale i napětí naprázdno. V případě, že generátor pracuje v ostrovním režimu, reguluje se buzení především podle napětí, ale ovlivňuje i účinník. Pokud pracuje podbuzený generátor do kapacitní zátěže, může dojít i tzv. samobuzení, kdy se stroj sám přibuzuje jalovou energií z kapacitní zátěže a jeho napětí se samovolně zvětšuje a ohrožuje

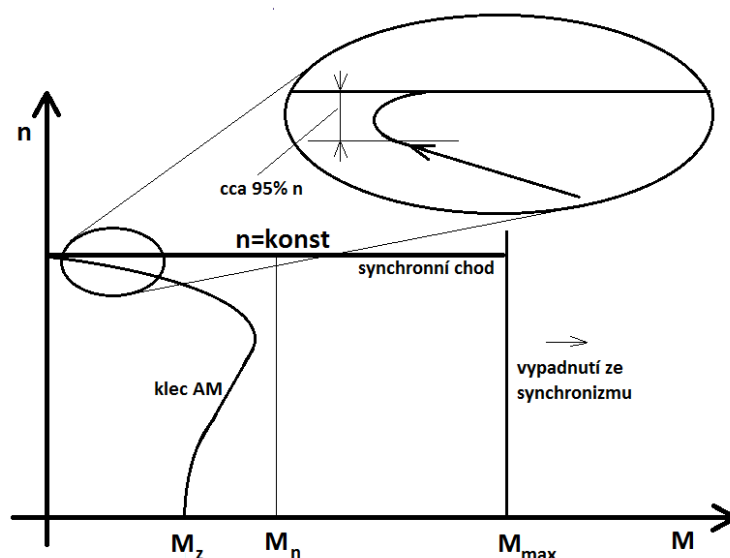
tak izolační systém generátoru. Při chodu generátoru v tvrdé síti se dá obecně říct, že se reguluje buzení podle účinníku sítě.

Problematika určení budicího proudu je ovšem mnohem komplikovanější. Pro přesné určení buzení pro daný provozní stav a dané síťové parametry se využívají budicí charakteristika, indukční charakteristiky a v- křivky stroje.

3.1.6. Spouštění synchronního motoru

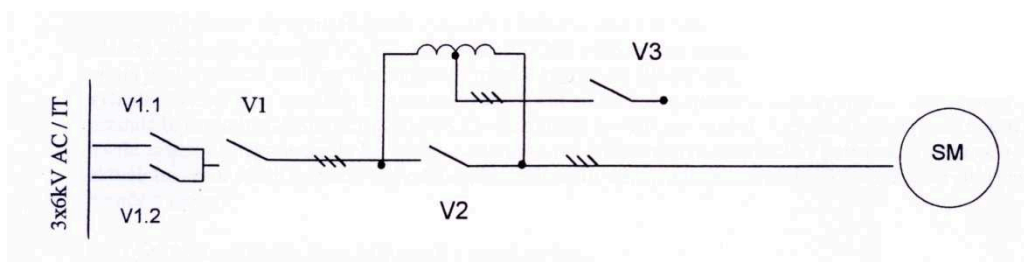
Proces spouštění synchronního motoru je oproti ostatním běžně používaným pohonům poměrně komplikovaný a probíhá v několika krocích. Problémem synchronního motoru je, že má sám o sobě nulový záběrný moment, není tedy se schopen roztočit sám. Navíc pokud motor nepracuje v synchronizmu, je z pohledu provozních veličin ve stavu nakrátko, což namáhá stroj tepelně a mechanicky. Je tedy potřeba dobu rozběhu zkrátit na minimální možnou. Výjimkou v tomto směru je rozběh cizím pohonem, kde se statorové vinutí připojuje až při dosažení synchronních nebo téměř synchronních otáček.

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem rozběhu je asynchronní rozběh (jinak též autosynchronní) pomocí klece nakrátko. Tato klec se zpravidla vytvoří spojením amortizérů kruhy nakrátko. Při připojení statoru na napájecí síť, je v kleci vybuzen točivým magnetickým polem reakční moment, který rotor roztáčí se stejným průběhem momentové charakteristiky, jako má standardní asynchronní motor. Pokud se motor rozbíhá naprázdno, je možno provést spojky mezi amortizéry menším průřezem tak, aby se klec chovala jako odporová, a tím došlo ke zvětšení záběrného momentu a tím zkrácení doby rozběhu. Skluz při chodu naprázdno musí však být tak malý, aby mohl se rotor po nabuzení sám vtáhnout do synchronizmu. Pokud se motor rozbíhá pod zatížením, je potřeba rovněž zajistit vtažení do synchronizmu.



Obr. 7 Vtažení do synchronizmu [16]

Pro těžké rozběhy se používají metody spouštění s přepnutím rotorového vinutí hvězda- trojúhelník, spouštění přes tlumivku nebo rozběh přes autotransfornátor sníženým napětím. Příklad zapojení takového rozběhu je na Obr.8. Motor je nejprve připojen přes spouštěcí autotransfornátor se spojeným uzlem vinutí (sepnuty vypínače V1 a V3). V dalším kroku dojde k rozpojení uzlu vinutí spouštěcího autotransfornátoru (V3) a ten pak plní funkci pouze jako předřazená reaktance. V posledním kroku dojde k připojení motoru přímo na síť (sepnutí V2). Teprve poté, až stoupnou otáčky motoru těsně pod synchronní, se motor nabudí a je vtažen do synchronizmu.



Obr. 8 Zapojení pro rozběh motoru 4,25 MW

Při spouštění se v rotorovém budícím vinutí indukuje napětí úměrné skluzu rotoru v asynchronním režimu, což ovšem je několikanásobek běžného provozního napětí buzení. Toto napětí nebezpečně ohrožuje izolační systém vinutí, sběracího ústrojí i dalších přístrojů v obvodu buzení stroje. Proto se budící vinutí při asynchronním rozběhu zkratuje přes odpor o hodnotě přibližně $(5-10)R_b$.

3.2. Konstrukce synchronního stroje

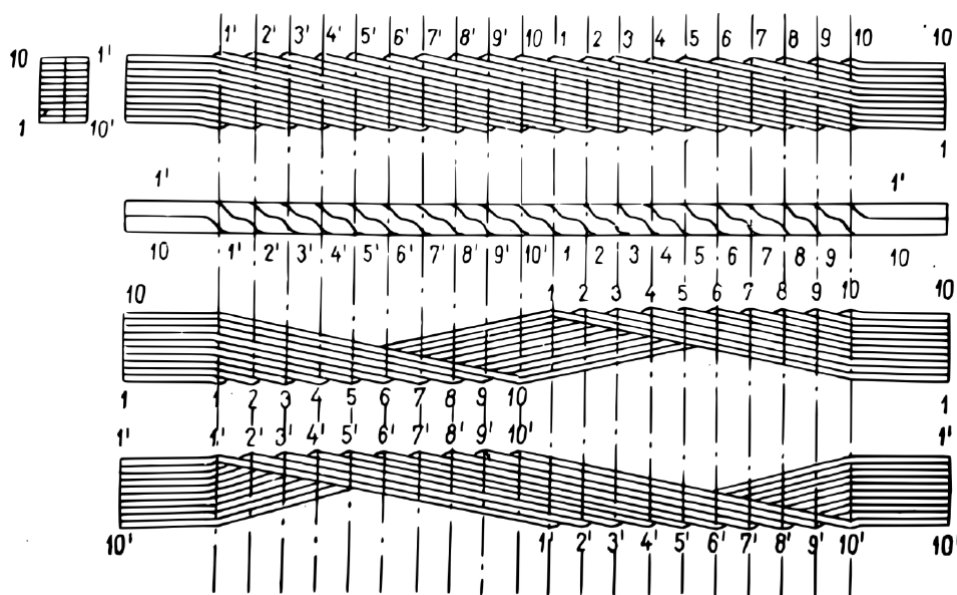
3.2.1. Provedení a konstrukce statoru

Stator synchronního stroje je v podstatě stejný, jako stator asynchronních strojů. Jediným rozdílem při návrhu je větší vzduchová mezera oproti asynchronním strojům. U větších strojů (řádově nad 200 kW) s přímým vzduchovým chlazením je rotorový paket příčně dělený pro lepší chlazení nejen samotného paketu, ale i statorového vinutí. Velké stroje pak mají chlazení buďto kapalinové (vodní) nebo jsou chlazeny přetlakovou atmosférou vodíku. Pro vodík však bývá použit také dělený paket.

Samotné vinutí statoru může být provedeno několika způsoby podle typu vodičů a podle způsobu vkládání vinutí:

- Vsypávané vinutí z vodičů kruhového průřezu (pro NN stroje)
- Vinutí z profilovaných vodičů (vkládají se předpřipravené a předizolované izolované cívky)
- Tyčové vinutí (vkládají se tyče, které se pak na čelech spojují pájením nebo svařováním)

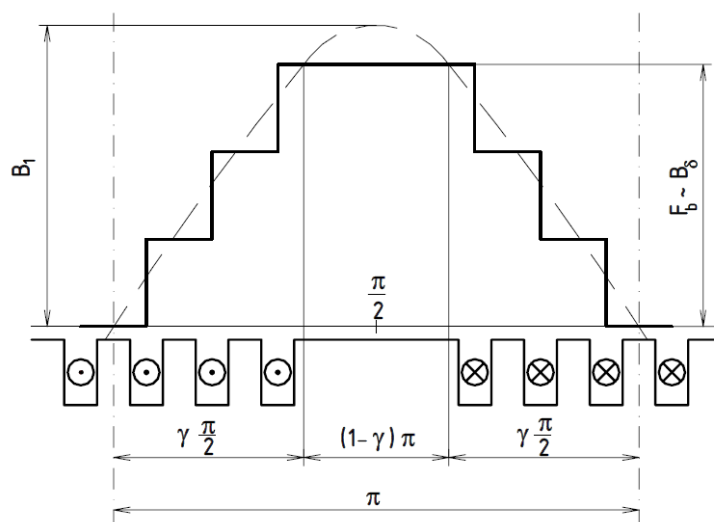
Pro tyčová vinutí se používají tzv. permutované, nebo také Roeblovy tyče. Jedná se o izolované paralelní vodiče, které jsou v délce tyče vzájemně vystřídány tak, že každá tyč postupně vystřídá všechny pozice. Tímto způsobem se z velké části eliminuje nežádoucí vliv vířivých proudů (způsobují ztráty). Permutované tyče rovněž zabraňují se tak toku vyrovnávacích proudů mezi tyčemi tím, že se v tyčích neindukují různá napětí vlivem různé polohy. Princip vytvoření Roeblovy tyče z dvaceti izolovaných profilových vodičů je na Obr. 9.



Obr. 9 Vytvoření permutované(Roeblovy) tyče [17]

3.2.2. Provedení vinutí a konstrukce rotoru

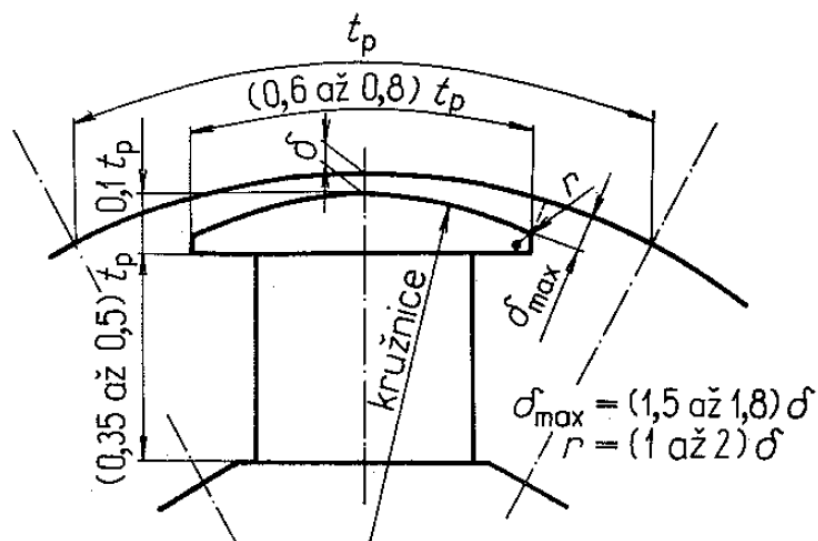
Pro čistě sinusový průběh, požadovaný pro optimální chod přenosových a distribučních sítí je potřeba vytvořit po obvodu statoru sinusový průběh magnetické indukce. U turbostrojů s hladkým rotorem se toho dosahuje vhodným rozložením vinutí po obvodu rotoru. Vinutí není navinuto pouze do dvou protilehlých drážek, ale je po obvodu rozloženo do více většinou soustředných cívek. Běžné je provedení vinutí ve $2/3$ obvodu rotoru, $1/3$ pak leží v ose pólu a určuje zakřivení magnetického pole v jeho amplitudě. Tímto způsobem dosáhne přibližně lichoběžníkového tvaru, jak je uvedeno na Obr.10.



Obr. 10 Drážkování hladkého rotoru a rozložení magnetické indukce [13]

Díky rozptylu magnetického toku ve vzduchové mezeře nebude průběh stupňovitý, ale částečně se vyhladí. Vlivem přesycení zubů mezi drážkami a málo sycené střední části v ose pólu se výsledný tvar indukce ještě více přiblíží sinusovému průběhu.

Pomaloběžné stroje s vyniklými póly mají budící rotorové vinutí soustředěno na pólových nástavcích rotoru, proto není možné použít tento postup úpravy průběhu indukce. Pro deformaci pole se využívá změny velikosti vzduchové mezery tak, že se směrem od středu pólového nástavce zvětšuje. Rozměry a profil pólového nástavce vychází z pólové rozteče a velikosti nejužšího místa vzduchové mezery, jak je uvedeno na Obr. 11.



Obr. 11 Tvar pólového nástavce stroje s vyniklými póly [6]

Budící vinutí je stejnosměrné a navrhuje se především podle požadovaného budícího proudu, Budící proud je omezen buďto provedením kroužků, nebo provedením bezkartáčového budícího systému.

Z hlediska chlazení není u rotorů s vyniklými póly problém s chlazením, protože je mezi póly prostor pro obtékání vzduchem. Pokud je statorový paket dělený, může být celý stroj chlazen dvěma ventilátory na čelech rotoru s nasáváním vzduchu mezerami v dělení statorového paketu. Stroje s hladkým rotorem sice mají větší vzduchovou mezeru, než asynchronní stroje, ovšem ta lze využít k chlazení pouze omezeně. Rotor může být chlazen ventilací v příčném směru přes celý průměr rotorového paketu (a to jak vzduchem, tak vodíkem), nebo se mezi vrstvy rotorového budícího vinutí vkládá chladicí potrubí pro kapalinové chlazení.

Budící systém můžeme dělit podle několika kritérií na:

- Závislé, nezávislé a kompaundní budící systémy
- Statický nebo rotační budič
- Kartáčová nebo bezkartáčová budící soustava

Nejčastěji používaná jsou provedení budičů jako:

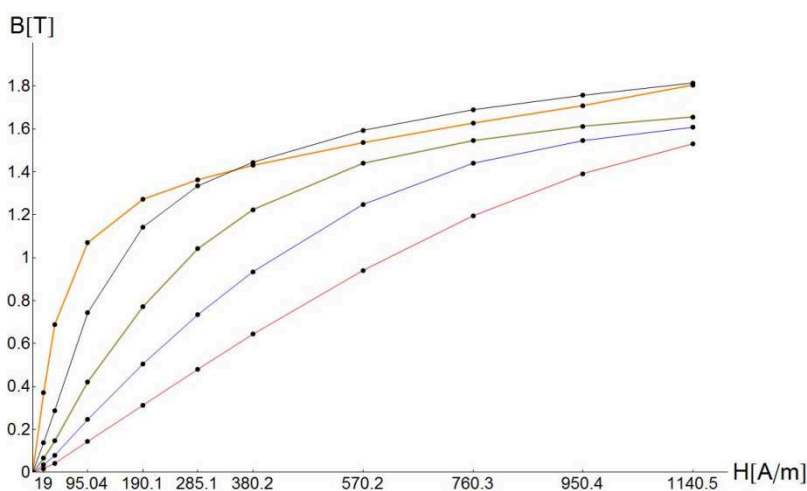
- Rotační komutátorový budič (DC dynamo)
- Statický nezávislý budič s kroužky
- Budič s rotačním usměrňovačem (bezkartáčový)
- Budič s rotačním transformátorem (bezkartáčový)

3.2.3. Materiály magnetického obvodu

Stator všech střídavých motorů musí být proveden z dynamo plechů, protože statorem prochází střídavý magnetický tok, který by v kompaktním materiálu způsoboval velké ztráty vířivými proudy. Tyto plechy mohou být vystřihovány v celku, nebo jsou složeny do svařované kostry z jednotlivých segmentů. V případě, že jsou statorové plechy skládány ze segmentů, lze použít orientované plechy s orientací podél jha statoru. V zubech sice budou vyšší ztráty, ale toto teplo bude odvedeno do jha, a celkové ztráty vířivými proudy se sníží. Využití orientovaných plechů je zvláště výhodné u statorů pomaloběžných strojů, např. hydroalternátorů, kde je stator složen z velkého počtu segmentů. Orientované plechy naopak nelze použít u strojů nestatorovými plechy v kuse.

Dynamoplechy jsou vyráběny z křemíkové oceli (0,5- 3,5% Si [20]) o tloušťce 0,35-1 mm. Neorientované plechy jsou válcovány jako standardní plech při vysokých teplotách. Oproti tomu orientované plechy jsou taženy za studena, při teplotě, která nepřekročí teplotu 768°C. Tato teplota je nazývána Curieova teplota je teplota, při níž feromagnetika ztrácí své magnetické vlastnosti. Pokud je plech válcován při nižší teplotě, jsou mechanicky válcováním seřazeny magnetické domény ve směru válcování a plech tak v tomto směru vykazuje menší magnetický odpor a menší ztrátové číslo.

Ztrátové číslo udává ztráty v jednom kilogramu plechů při syčení 1 T a frekvenci 50 Hz. Neorientované dynamoplechy mají ztrátové číslo 2- 3,6 W/ kg [20] ve všech směrech. Oproti tomu orientované plechy mají ztrátové číslo ve směru válcování 1,1- 3,6 W/kg, [20] přičemž v e směru kolmém na válcování je ztrátové číslo větší asi jen o 30%.



Obr. 12 Magnetizační charakteristika orientovaného plechu v různých směrech magnetizace [19]

3.2.4. Materiály izolace

Konstrukce jakéhokoliv elektrického stroje je z hlediska teploty nejvíce limitována maximální možnou dovolenou teplotou izolace s ohledem na její životnost. Volba teplotní třídy izolace pro daný stroj závisí především na požadovaných podmínkách provozu, provozní spolehlivosti, životnosti a na ekonomických faktorech. V praxi se u elektrických pohonů dnes využívají téměř výhradně izolace třídy F a vyšší.

Dalším limitujícím faktorem je teplota okolí, respektive teplota chladicího vzduchu. Standardní sériově vyráběné stroje se běžně konstruuje pro teplotu okolí 40°C. V případě, že budou podmínky odlišné, je samozřejmě zapotřebí přistupovat k tomuto problému individuálně. Pro stanovení teploty okolí pro daný prostor by se mělo vycházet z příslušného protokolu o určení vnějších vlivů, který navíc specifikuje i exponovanost stroje na slunci nebo jiných zdrojů tepla.

| Třída izolace | $\Delta\Theta_{\text{dov}}$ [K] | Θ_{dov} [°C] |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------|
| A | 60 | 100 |
| E | 75 | 115 |
| B | 80 | 120 |
| F | 100 | 140 |
| H | 125 | 165 |

Tab. 1 Teplotní třídy izolace podle ČSN EN 60085 [11]

Izolace vodičů se může skládat z laku, opředení bavlnou neoskleněnými vlákny, popřípadě z dalších vrstev materiálů. Další vrstvy se většinou tvoří kombinací pevné a nanášené izolace. Izolace vodičů závisí na maximálním možném mezizávitovém napětí v dané skupině sousedících vodičů. Největší je toto napětí u vsypávaných vinutí, proto se toto provedení používá prakticky výhradně u strojů do 3 kV.

Velké vysokonapěťové stroje mají provedeno vinutí buďto ze samostatných cívek profilových vodičů, nebo jako tyčové. Izolace profilových vodičů pro cívky závisí na cívkovém napětí, ale většinou není v rámci cívky mezizávitové napětí tak velké, aby nestačila izolace lakem, nebo lakem a opředěním bavlnou nebo skleněnými vlákny.

Drážková izolace se u menších strojů se vsypávaným vinutím provádí drážkovou lepenkou, vyráběnou ze sběrného papíru, bavlny a sulfánové buničiny. Mohou se používat i obyčejné lepenky, transformátorové lepenky s olejovou impregnační nebo vícevrstvé plošné izolanty.

Pro vícevrstvé plošné izolanty se používají materiály s označením [17]:

- E- Polyetyléntereftalátová fólie (většinou základní materiál)
- S- Skleněná tkanina
- K- Polyamidová fólie
- L- Aramidový papír
- N- Polyesterová rohož
- P- Elektrotechnická lepenka
- R- Slídový papír

Drážková izolace vysokonapěťových strojů se zpravidla nevkládá do statoru, ale provádí se přímo na statorové tyče nebo cívky. Dnes se používá prakticky výhradně dvou postupů, a sice technologie ResinRich(prosycení pryskyřicí) nebo VPI (VacuumPressureImpregnation- vakuová impregnace).

Technologie ResinRich využívá kompozitní pásy, která je již předimpregnovaná s 30-40% pojiva. Takováto páska se buďto navine po celé délce cívky (kontinuální navíjení), nebo se navíjí fólie na drážkovou část vinutí, a čela jsou ovinuta páskou (diskontinuální navíjení). Cívky nebo tyče s takto navinutou izolací se následně vytvrzují lisováním při teplotě 160- 170 °C po dobu přibližně jedné hodiny. Takto vytvrzené a cívky jsou připraveny na vkládání.

Technologie VPI (VacuumPressureImpregnation) používá obdobný postup kontinuálního ovíjení páskou nebo diskontinuálního ovíjení fólií jako technologie ResinRich, ovšem páska není předimpregnovaná, ale jedná se o vysoce savou slídovou pásku. Cívky se nejprve důkladně vysuší při 100°C přibližně za 20 hodin. Poté se umístí do impregnačního kotle, kde se vytvoří vakuum a kotel se postupně zaplaví teplým impregnantem. Po úplném zaplavení po nějakou dobu dochází k odplynění izolace. Následně je impregnační kotel namísto vakua přetlakován a ponechá se tak hodinu. Po vypuštění impregnantu se izolace suší za mírného podtlaku, později se dosuší za atmosférického tlaku. Technologie vakuové impregnace nejlepší možná z hlediska degradace izolace částečnými výboji, protože výsledný izolant neobsahuje žádné vzduchové či jiné bublinky, ve kterých by částečné výboje vznikaly.

Pomocí vakuové impregnace je možno impregnovat stejným postupem i celý paket i s vloženým vinutím. Takto impregnovaný stator však prakticky nejde, v případě poruchy, opravit jednotlivé části stroje ale je nutné celkové převinutí.

3.2.5. Sběrací ústrojí

Kroužky jsou vyrobeny z tvrdé elektrotechnické mosazi a jsou opatřeny na jednom z krajů zápichem, pro určení míry opotřebení. Zápich je zároveň mezí přípustného opotřebení kroužků. Kroužky pro přenos velkých budících proudů, např. u turbogenerátorů tepelných elektráren, se kroužky opatřují po obvodu spirálovou drážkou. Tato drážka zajišťuje průběžné odstraňování opálených zbytků grafitu a jiných nečistot z kartáčů. Tímto se zajišťuje dobrý přenos budícího proudu s minimálními ztrátami, bez zanášení zvlnění a bez jiskření (větší úbytek kartáčů, ale menší opotřebení kroužků).

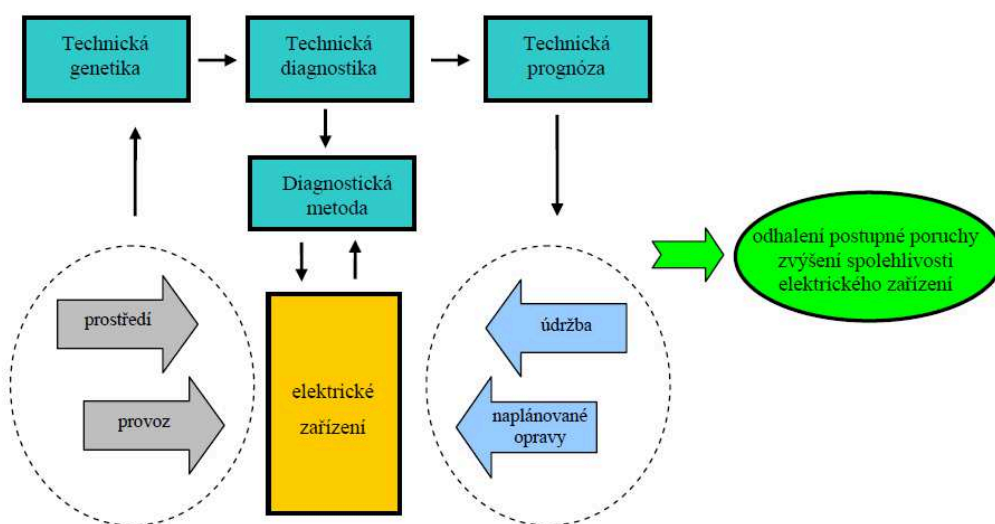
V praxi se více opotřebovávají kroužky na kladném pólu buzení, proto se někdy u velkých strojů při každém startu nebo po určitých motohodinách chodu provádí přepólování buzení.

4. Rozbor diagnostických metod

Technická diagnostika jako taková spočívá ve zjištění aktuálního stavu, její praktický význam však může být různý pro různé situace:

- Lokalizace, konkretizace poruchy nebo příčin nežádoucích jevů (diagnostika poruchy)
- Určení hranice únosné míry rizika
- Na základě diagnózy vytvořit prognózu

Cílem diagnostiky je zajištění prodloužení životnosti, bezpečnosti a spolehlivosti zařízení. Největším problémem pro diagnostiku je najít přímý vztah mezi měřitelnými, či jinak exaktně určitelnými parametry a konkrétní funkční vlastností daného zařízení.



Obr. 13 Význam technické diagnostiky [18]

Diagnostické metody se obecně dají dělit podle různých kritérií:

- Podle provozního stavu:
 - Online (funkční) diagnostika
Zdrojem diagnostické veličiny je samotné zařízení při svém provozu. Jedná se například o měření hluku, vibrační diagnostika, harmonickou analýzu proudu, měření oteplení.

- Offline (testovací) diagnostika
Zdrojem diagnostického signálu je cizí zařízení. Zařízení je nutné odstavit z provozu, někdy je potřeba zařízení částečně demontovat z technologického celku nebo dokonce vlastní zařízení rozebrat. Takováto měření jsou například měření odporu, izolačního odporu, polarizačního indexu, ztrátového činitele $\tan\delta$, napěťová zkouška, zkouška rázovou vlnou.
- Podle vlivu na zařízení:
 - Nedestruktivní
Zařízení nemůže být při měření nijak poškozeno. Do této skupiny patří veškeré metody online diagnostiky, protože pokud zařízení není poškozeno, není pro něj běžný provozní stav nijak nebezpečný.
 - Částečně destruktivní
Využívají se tam, kde „není co ztratit“ například pokud je zařízení částečně poškozeno a testuje se stav ostatních částí zařízení.
 - Destruktivní
Využívají se v případech, že je zařízení poškozeno ale je potřeba zjistit příčiny poruchy. Mohou se používat v rámci certifikace jakožto například životnostní zkoušky, zkoušky, při nichž se testuje ohrožení zdraví při závadách u domácích spotřebičů atd., u některých typových zkoušek.
- Podle potřeby demontáže:
 - Bezdemontážní
Zařízení zůstává namontováno na v technologii a diagnostika se provádí na místě. Do této skupiny patří všechny online metody a některé offline metody, které nevyžadují manipulaci se zařízením, či přístup dovnitř.
 - Demontáž z technologického celku
Diagnostikované zařízení je potřeba demontovat jako celek. Většinou pak vlastní diagnostika probíhá mimo místo provozu zařízení. Jedná se například o měření naprázdno, nakrátko.
 - Demontáž vlastního zařízení
Je potřeba přístupu k některým součástem zařízení, které jsou běžně nepřístupné, nebo je potřeba testovanou součást zcela vymontovat. Mezi tyto metody patří například magnetizační zkouška, měření magnetického pole.

Zvláštní diagnostickou metodou je vizuální kontrola, která může být prováděna při použití všech výše zmiňovaných postupech. Vizuální kontrola je základní a nejjednodušší metodou, kterou je dobré provádět kdykoliv je to možné.

Pro diagnostiku momentálního stavu synchronního stroje je možno použít poměrně velké množství sofistikovaných metod zkoušení a měření, pomocí nichž lze zhodnotit aktuální stav stroje, či snad dokonce predikovat blížící se havárii. Mnoho měření se provádí proto, že jimi lze zjistit určitý problém, který by mohl přerůst ve vážnější hrozbu, již v počátku. Různé diagnostické metody poskytují představu o různých parametrech či souboru parametrů. Každý elektrický stroj je však provozován jako celek, proto je potřeba i naměřené ukazatele vždy posuzovat v souvislosti daného typu, výkonu, konstrukce a použití stroje.

4.1. Vizuální kontrola stroje

Vizuální kontrola je nejzákladnější a nejstarší metodou diagnostiky, která i přes všechny moderní možnosti měření zůstává jednou z nejpodstatnějších součástí diagnostiky stavu stroje. Při prohlídce statoru je potřeba se především zaměřit na následující součásti.:

- Utažení šroubů elektrických spojů připojení vinutí
- Porušení izolace vývodů nebo čel vinutí
- Tuhost bandáží a rozpěrných klínů
- Vůle vinutí
- Opotřebení kroužků
- Viditelné mechanické poškození, ojiskření, přehřátí.

4.1.1. Vizuální kontrola statoru

Rotorový paket musí být dobře stažen, nesmí být uvolněny plechy, kontrolujeme utažení všech šroubů, čistotu vinutí, čistotu izolátorů a dotažení a čistotu připojovacích svorek.

Radiální neboli drážkové klíny se kontrolují odezvou při poklepu. Pokud krajní klín nezní tvrdě alespoň v 75% své délky a zároveň tři krajní klíny nezní tvrdě v průměru na 75% své délky, tuhost drážkových klínů nevyhovuje. Zbývající klíny musí znít tvrdě průměru minimálně v 60% délky. [3]

Vůle vinutí se kontrolují měrkou 0,2 mm, která nesmí jít vsunout v celé délce krajního paketu mezi vinutí a drážku více než do 1/3 výšky tyče nebo cívkové strany. Ve zbytku drážky nesmí jít zasunout více, než 1/3 výšky tyče nebo lze v axiálním směru posunout více než 50 mm. [3]

Kontroluje se rovněž tuhost rozpěrek na výstupu z drážky, rozpěrek hlav vinutí tuhost bandáží a celková tuhost čel vinutí. Všechny tyto komponenty musí vykazovat stoprocentní tuhost. [3] V rámci kontroly paketu se kontrolují i systémy pro měření a regulaci, nejčastěji poškození teplotních čidel. V rámci vizuální prohlídky se provede přeměření odporu, či dodržení jiných vlastností teplotních čidel.

Pokud po rozebrání stroje je možný přístup k ložiskům, zkontrolujeme jejich poškození opotřebení mazání, radiální vůle. Pokud jsou ložiska kluzná, je možno zkontrolovat čistotou olejových kanálků. Při demontovaném rotoru je možno prověřit izolaci ložiska (pokud stroj má izolované ložisko). Protože ložisková izolace je namáhána pouze malými napětími, postačí jednoduché proměření kontinuity např. multimetrem.

4.1.2. Vizuální kontrola rotoru

Kontrola rotoru se mírně liší pro stroje s hladkým rotorem od s vyniklými póly a to kvůli rozdílné konstrukci a kvůli jiným provozním podmínkám a jinému namáhání u turbostrojů a u pomaloběžných strojů.

Pro vinutí stroje s hladkým rotorem platí obdobná pravidla jako pro statorový paket (viz kapitola 4.1.1). Navíc je potřeba kontrolovat bandáže čel vinutí. U menších strojů, kde jsou bandáže provedeny běžnými izolačními materiály a impregnací, je potřeba si všimnout zejména případných prasklin. Pokud se jedná o velký stroj, který má bandáže provedeny kovovými kruhy, je potřeba provádět pravidelně defektoskopické zkoušky ve specializované zkušebně podle pokynů výrobce. Takovéto zkoušky mohou odhalit mikroskopické únavové trhlinky, které by mohly postupně přerůst ve fatální havárii s dalekosáhlými důsledky.

Rotor s vyniklými póly je montovaný, proto je potřeba prověřit dotažení všech spojů, pevné spojení klínových spojů. Pevné uložení cívek, utažení rozpěrných klínů mezi vinutím. Důležitá je kontrola doražení všech elektrických spojů. Pájené spoje, především na spojkách amortizérů nebo kruhů nakrátko musí být dobře zalité.

U všech strojů kontrolujeme známky opotřebení na hřídeli v místech montáže ložisek, nebo dosedací plochy kluzných ložisek. Rovněž kontrolujeme stav dosedacích ploch pro spojku nebo jiné mechanické připojení stroje.

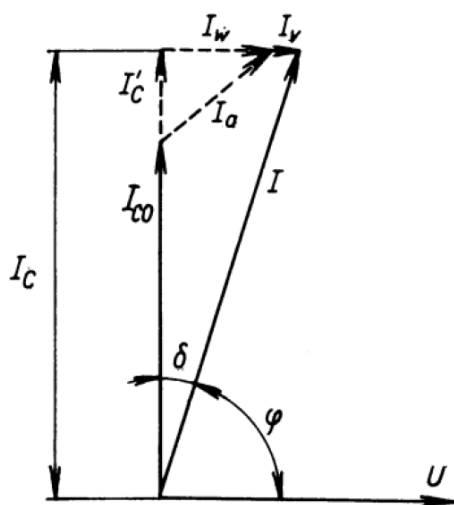
Pokud je rotor vybaven sběracím ústrojím, je potřeba kontrolovat opotřebení kroužků. Továrně jsou kroužky na kraji opatřeny malým zápichem, který slouží jako reference pro měření míry opotřebení, nesymetrii opotřebení a zároveň jako označení minimálního dovoleného průměru kroužku. Jestliže zápich není znatelný nebo je li zřejmé, že by do příští opravy stroje došlo k nadměrnému opotřebení, je potřeba provést výměnu kroužků. Stroje s velkými budícími proudy, především pak turbogenerátory, mívají spirálový zápich pro čištění sběrných kartáčů. Tento zápich nesmí mít otřepy a nesmí být zanešený.

4.2.Diagnostika na izolačním systému

Izolační systém je u vysokonapěťových strojů nejnáchylnější na poškození a to jak tepelně, tak, při nesprávné manipulaci, mechanicky. Izolace strojů je tepelně namáhána tepelnými ztrátami v mědi a v železe a dielektrickými ztrátami, elektricky elektrickým polem a mechanicky při tepelných změnách nebo při manipulaci se strojem. Každý z těchto vlivů může izolační systém poškodit, proto je potřeba každé takovéto poškození zjistit již v počátku.

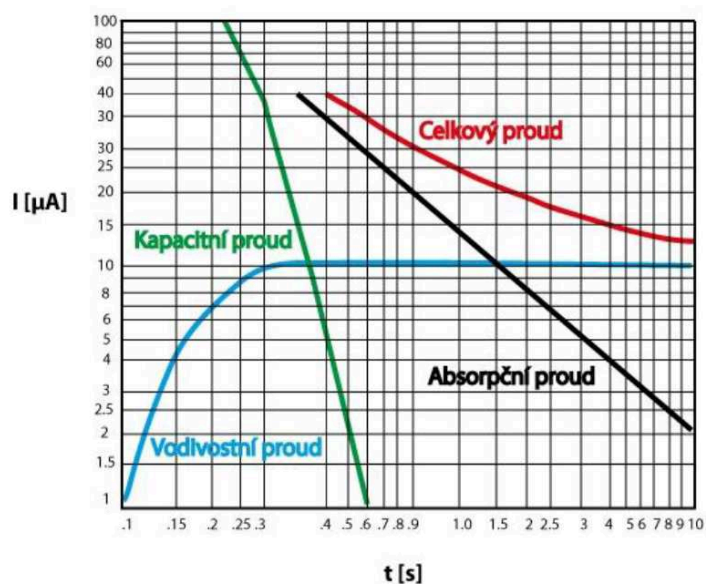
Izolační systém elektrických strojů podléhá ze všech elektrických součástí, z časového hlediska, nejrychlejší degradaci. Protože poruchy izolace strojů vedou většinou k dlouhým odstávkám, je žádoucí takovýmto poruchám předcházet nebo je včas zjistit. Problematiku profylaktiky izolačních systémů vn motorů zpracovává mimo jiné i podniková norma PN 0006 rev01 společnosti ČEZ a.s[6]. Následující kapitoly podrobně rozpracovávají jednotlivé metody pro diagnostiku, jak jsou uvedeny v kapitole 10 této normy.

K průrazu izolace může dojít buďto k čistě elektrickému nebo k tepelnému průrazu. Při tepelném průrazu působí na izolant dielektrické teplo, Jouleovy ztráty a okolní teplo, čímž se jeho elektrická pevnost sníží pod úroveň intenzity přítomného elektrického pole a dojde k průrazu. Čistě elektrického průrazu se neúčastní vliv zvýšené teploty izolantu.



Obr. 14 Fázorový diagram reálného dielektrika [17]

- I_{C0} - kapacitní proud ideálního dielektrika
- I'_C - kapacitní (jalová) složka absorpčního proudu
- I_a - absorpční proud vyvolaný pomalými polarizacemi
- I_W - činná složka absorpčního proudu
- I_V - vodivostní proud
- I - proud dielektrika se ztrátami



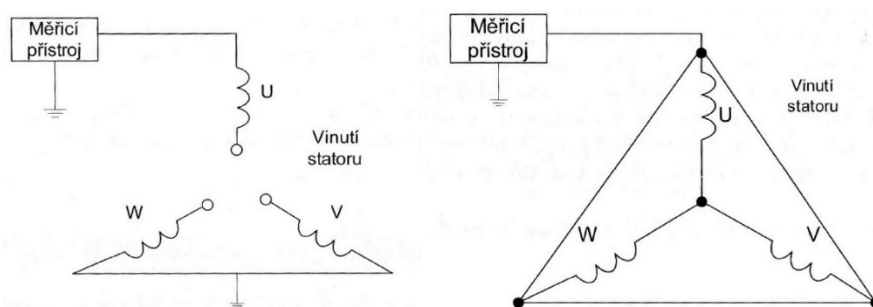
Obr. 15 Průběh složek proudů po připojení dielektrika ke stejnosměrnému proudu [4]

4.2.1. Izolační odpor a polarizační index statorového vinutí

Postup měření:

Na satoru stroje se měří izolační odpor v závislosti na čase po dobu minimálně deseti minut kvůli možnosti vypočtení polarizačního indexu. Kritéria pro vyhovění zkoušce jsou stanovena na izolační odpor v čase 60s označovaný jako R_{iz60} , a v čase 600s označovaný jako R_{iz600} . Polarizační index se určuje rovněž pro dobu 60s a 600s. V literatuře jsou někdy uváděny také jako jednominutové a desetiminutové.

Všechny měření izolačního odporu a polarizačního indexu se provádí za vlhkosti menší než 90% a teploty vinutí 5- 30°C. Vinutí hydroalternátorů se měří při chladnutí z provozu při 20- 30°C. Pokud to je možné, rozpojí se uzel vinutí, vodní chlazení se vypustí a vysuší [4]. Měření izolačního odporu a polarizačního indexu se provádí pro vinutí každé fáze zvlášť s uzemněním všech ostatních obvodů, pokud je to možné.



Obr. 16 Měření izolačního odporu s rozpojitelným uzlem a s nerozpojitelným uzlem[21]

Izolační odpor se vypočte jednoduše z Ohmova zákona:

$$R_{iz} = \frac{U}{I} \quad (9)$$

Výpočet polarizačních indexů se provádí z časové závislosti měření izolačního odporu [4]:

$$p_{iz60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \quad (10)$$

$$p_{iz600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} \quad (11)$$

Kritéria pro vyhovění zkoušce jsou:

| Veličina | Min. dovolená hodnota | Min. doporučená hodnota |
|-------------|--------------------------|----------------------------|
| R_{iz60} | $\geq 2 \text{ M}\Omega$ | $\geq 200 \text{ M}\Omega$ |
| R_{iz600} | Není určena | $\geq 800 \text{ M}\Omega$ |
| p_{i60} | Není určena | v rozmezí 1,5 až 4 |
| p_{i600} | $p_{i600} > p_{i60}$ | |

Tab. 2 Mezní a doporučené hodnoty izolačního odporu a polarizačního indexu pro stator[3]

Izolační odpor se měří stejnosměrným proudem pro dobu 60s a 600s. Pro vyhovění zkoušce pak musí na všech napěťových hladinách, pro které se měří, izolační odpor stoupat v čase.

Musí tedy vždy pro každé napětí platit:

$$R_{iz600} > R_{iz60} \Rightarrow P_{i600} > 1 \quad (12)$$

4.2.2. Izolační odpor polarizační index rotorového vinutí

Měření izolačního odporu rotorového vinutí se provádí obdobně jako měření statorového vinutí ovšem stačí jej měřit pouze pro časový rozsah jedné minuty. Izolační odpor by po dobu životnosti stroje nijak výrazně klesat. Pokud však náhle klesne, může to být dáno poškozením izolace nebo nečistotami a vlhkostí na vinutí.

Kritéria pro vyhovění zkoušce jsou:

| Veličina | Min. dovolená hodnota | Min. doporučená hodnota |
|------------|----------------------------|--|
| R_{iz60} | $\geq 0,5 \text{ M}\Omega$ | v intervalu 0,1 až 0,5 $\text{M}\Omega$ lze provozovat stroj při zvláštních opatřeních |
| P_{i60} | ≥ 1 | |

Tab. 3 Mezní a doporučené hodnoty izolačního odporu a polarizačního indexu pro rotor [3]

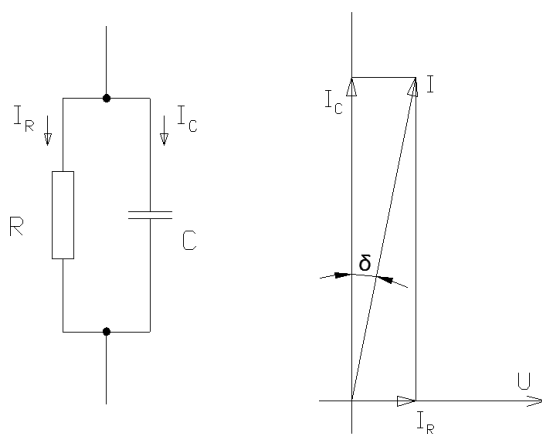
4.2.3. Napěťová závislost izolačního odporu vinutí

S rostoucím napětím u dielektrik roste i izolační odpor až do ustáleného stavu a při dalším zvyšování napětí začne klesat až k bodu průrazu. Tato metoda vychází z předpokladu, že je izolace stroje navržena tak, aby se za běžných provozních stavů pohybovala v oblasti pod bodem, kdy klesá. Při porušení izolace se tento bod posune pod jmenovité napětí a projeví se jako záporná napěťová závislost izolačního odporu. Touto metodou lze zjistit porušení izolace při použití nižšího napětí, než je průrazné.

4.2.4. Ztrátový činitele $\tan\delta$, kapacita a časová konstanta vinutí

Hodnota kapacity vinutí sama o sobě není žádným způsobem směrodatným ukazatelem stavu izolace. Při jejím porovnání v dlouhodobém časovém horizontu však lze při náhlých velkých odchylkách detekovat změny v izolačním systému statoru. Význam kapacity je tedy pouze při srovnání dlouhodobého trendu nebo při porovnání s doporučenými hodnotami od výrobce.

K posouzení momentálního stavu má mnohem větší výpovědní hodnotu posouzení hodnoty ztrátového činitele $\tan\delta$ a jeho napěťové závislosti.



Obr. 17 Paralelní náhradní schéma a fázorový diagram izolace pro výpočet $\tan\delta$

Jak vyplývá z fázorového diagramu, ztrátový činitel $\tan\delta$ pro paralelní náhradní schéma se vypočte:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC} \quad (13)$$

Vzhledem k tomu, že kapacita vinutí se v závislosti na napětí nemění, zatímco izolační vodivost a polarizační ztráty s rostoucím napětím rostou, musí být i závislost $\text{tg}\delta$ na napětí rostoucí. Při jiném průběhu nebo náhlé skokové změně v průběhu by toto mohlo ukazovat na poruchu izolace.

Měření se provádí pro hodnoty napětí v rozmezí 20 až 100% U_n při použití střídavého napětí kvůli zohlednění polarizačních ztrát v dielektriku (doporučuje se použít jmenovitý kmitočet stroje). Pro všechny fáze stroje se měří kapacita vinutí C a ztrátový činitel $\text{tg}\delta$.

| Veličina | Min. dovolená hodnota | Min. doporučená hodnota |
|---|-----------------------|--|
| C_{U_n} | Není určena | Oproti novému stroji by se neměla odchýlit o více než 15% - jinak konzultovat s výrobcem |
| $\Delta\tau$ | ≥ 0 | |
| Pro nový stroj: | | |
| $\text{tg}\delta_{U_n}$ (pro U_n) | $\leq 0,035$ | |
| Pro stroj v provozu | | |
| $\text{tg}\delta_{U_n}$ (pro U_n) | $\leq 0,085$ | |
| $\text{tg}\delta_{0,2U_n}$ (pro 20% U_n) | $\leq 0,035$ | |
| $\text{tg}\delta_{0,6U_n}$ (pro 60% U_n) | Není určena | |
| $\text{tg}\delta_{0,6U_n} - \text{tg}\delta_{0,2U_n}$ | $\leq 0,01$ | |
| $\Delta\text{tg}\delta/\Delta U$ | ≥ 0 | |

Tab. 4 Mezní a doporučené hodnoty kapacity, ztrátového činitele a časové konstanty pro stator [3]

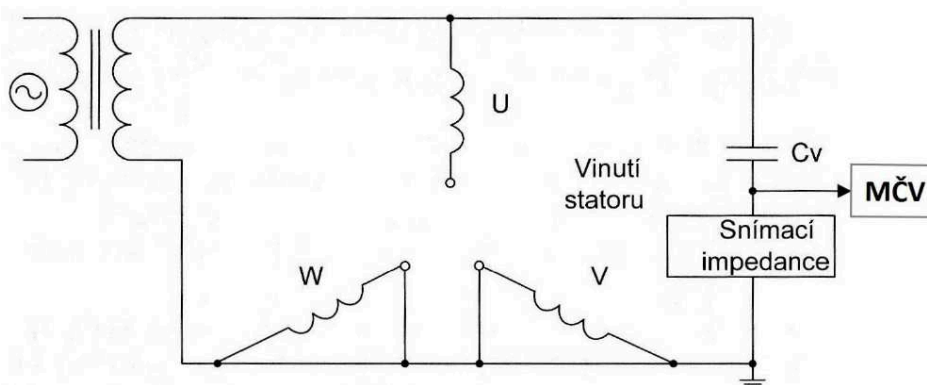
Časová konstanta vinutí je parametr, jehož hodnota není ovlivněna velikostí stroje. Může tedy být dobrým ukazatelem pro porovnání izolačního stavu různých typů strojů odlišných jmenovitých hodnot. Většinou se pro stroje určuje desetiminutová časová konstanta [4]:

$$\tau_{600} = R_{iz600} \cdot C_{Un} \quad (14)$$

Kde kapacita C je kapacita pro jmenovité napětí stroje v μF .

4.2.5. Měření částečných výbojů galvanickou metodou

Částečné výboje mohou vznikat na různých místech izolačního systému, například mezi izolační vložkou vinutí a statorovým paketem, mezi samotnou tyčí a izolací nebo ve vzduchové dutince uvnitř izolace. Částečné výboje jsou pro stroj nebezpečné, protože teplotně degradují okolní dielektrikum. Vlivem toho se ztenčuje stávající tloušťka izolace, v dielektriku roste intenzita pole a četnost částečných výbojů se zvětšuje.



Obr. 18 Zapojení pro měření částečných výbojů (MČV- měřič částečných výbojů)[21]

Při částečných výbojích, tyto výboje generují v zařízení proudové impulzy, které se šíří od místa vzniku ke svorkám stroje a odtud jsou přeneseny do měřicí sady. Vazební kondenzátor spolu se snímací impedancí tvoří hornopropustní filtr pro odfiltrování základní harmonického napájecího napětí a tím maximalizaci kontrastu mezi napájením a amplitudou výbojového pulzu.

Při měření částečných výbojů se měří zdánlivý náboj, po dobu nejčastěji jedné periody zkušebního napětí. Zdánlivý náboj je takový náboj, jehož mžikovým vybitím by vznikl na zkoušeném objektu právě takový nárůst napětí, jako při částečném výboji. Zdánlivý náboj se měří při fázovém napětí stroje.

| | | |
|---------------------|---|--|
| Pro nový stroj | $q \leq 10\,000 \text{ pC}$ | Vyhovuje |
| Pro stroj v provozu | $q \leq 10\,000 \text{ pC}$ | Vyhovuje |
| | $10\,000 \text{ pC} \leq q \leq 30\,000 \text{ pC}$ | Nutné individuální posouzení podle konstrukce stoje a izolace |
| | $q > 30\,000 \text{ pC}$ | Provede se měření za provozu i s chlazením voda- vodík, pokud bude i nadále stroj nevyhovuje |

Tab. 5 Kritéria vyhovění zkoušce částečných výbojů [3]

Měření částečných výbojů se provádí také jako komparativní, kde se při měření porovnávají amplitudy výbojových impulzů v jednotlivých fázích nebo, stejných částech vinutí.

Pro vyhovění musí být rozdíl mezi jednotlivými drážkami [3]:

$$\frac{q_{id}}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{Q}} < 5 \quad (15)$$

, kde q_{id} zdánlivý náboj v dané drážce
 q_i zdánlivý náboj v i-té drážce
 Q počet drážek

4.2.6. Měření částečných výbojů akustickou sondou

Tato metoda se používá jako doplňková metoda při detekci částečných výbojů galvanickou metodou. Pokud je galvanickou metodou zjištěna přítomnost nadměrných částečných výbojů, může to být způsobeno poškozením izolačního systému. Lokalizace takového místa poruchy je nejjednodušší pomocí akustické sondy. Ve zvuku z měřicího mikrofону se analyzuje míra šumu v oblasti ultrazvuku. Zařízení může být doplněno sluchátky pro poslech v akustickém pásmu.

Touto metodou není možné bez velké chyby určit míru výbojové činnosti, proto nelze použít jako kvantifikativní metoda. Pro stanovení četnosti výbojů slouží měření galvanickou metodou.

4.3.Diagnostika vibrací

Pro diagnostiku mechanického uložení nebo i elektrické nesymetrie lze s výhodou použít měření spektra vibrací. Pro tyto účely je při dnešních možnostech měřicích přístrojů nejvýhodnější použít měření s časovým záznamem, protože délka záznamu ovlivňuje jednak přesnost analýzy a jednak minimální možnou frekvenci ve spektru. Výhodné je též použít například pro ložiska vícekanálové měření pro různé směry pohybu. Z takto zaznamenaných dat lze provést nejen fourierovu analýzu, ale lze například určit i fázový posuv vibrací vzájemně, či vykreslit amplitudu vibrací v polárních souřadnicích. Lze také zobrazit celou spektrální analýzu v závislosti na čase, z čehož lze určit záznějové vibrace.

Naprosto zásadní pro měření vibrací stroje je výchozí určení měřicích bodů a směru osy, pro kterou jsou vibrace měřeny. Výrobce stroje by měl vždy určit měřicí místa pro měření vibrací a maximální dovolené hodnoty. Výkresy měřicích bodů a specifikace maximálních hodnot by vždy měly být součástí originální dokumentace ke stroji nebo alespoň servisního manuálu. Vibrace se vždy měří minimálně ve třech osách, a sice ve vertikálním radiálním směru, v horizontálním radiálním směru a v axiálním směru.

Vibrace se mohou měřit relativní nebo absolutní. Měření relativních vibrací je mnohem častější, protože tato metoda vyžaduje pouze jeden měřicí bod. Měří se rychlost pohybu nebo zrychlení vůči okolí respektive vůči pevnému bodu, který může představovat například samotná hmota měřicí sondy. Absolutní vibrace se měří prakticky výhradně pro určení vůle hřídelů mezi hřídelem a pouzdrem ložiska.

Mechanické příčiny vibrací mohou být [10]:

- Nevyváženost rotorů
- Nesouosost
- Ohnutý hřídel
- Mechanické uvolnění
- Poruchy ozubených a řemenových převodů
- Poškození valivých ložisek
- Zadírání
- Hydraulické a aerodynamické problémy
- Rezonance

Elektrické příčiny vibrací mohou být [18]:

- Méně optimální konstrukce stroje (např. vliv drážkování, přesycení)
- Ložiskové proudy
- Nesymetrie (poškozené vinutí statoru, poškozená tyč nebo vinutí rotoru)
- Zkratky v magnetickém obvodu

Měření vibrací se vyhodnocuje nejčastěji jako spektrum vibrací pomocí FFT analýzy (Fast Fourier Transformation). Frekvence se vyhodnocují jako složky harmonických pro každé měření. Základní harmonickou je vždy otáčková frekvence, která je pro synchronní stroje:

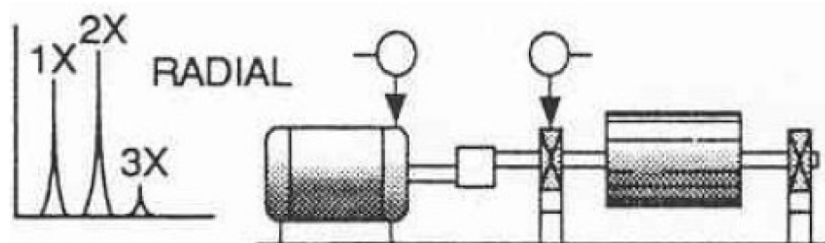
$$f_{ot} = \frac{f_s}{p} \quad (16)$$

Pokud jsou vibrace měřeny na soustrojí s převodovkou nebo jiným převodem, jsou základními harmonickými všechny otáčkové frekvence všech částí soustrojí. Otáčková frekvence redukována na výstup převodovky pak je:

$$f'_{ot} = f_{ot} \cdot i = f_{ot} \cdot \frac{n_1}{n_2} \quad (17)$$

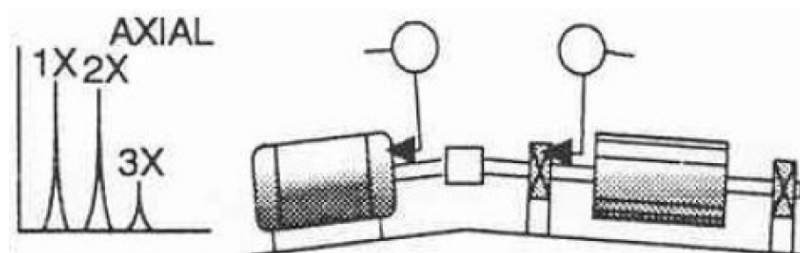
4.3.1. Nesouosost

Nesouosost může být způsobena špatným ustavením soustrojí, nebo posunem některého ze zařízení. Obecně se rozlišují dva základní typy nesouososti.



Obr. 19 Paralelní nesouosost a spektrum vibrací [10]

Paralelní nesouosost vzniká při špatném ustavení soustrojí tak, že jsou hřídele rovnoběžné, ale nejsou v ose. Při paralelní nesouososti se nejvíce projevují radiální vibrace, a to především na měřících bodech umístěných nejbližší problematickému místu (většinou spojce). Radiální vibrace budou mít jinou hodnotu v horizontálním směru než ve vertikálním. Pokud budou horizontální a vertikální vibrace stejné, jde nejspíše o nevyváhu [10].



Obr. 20 Úhlová nesouosost a spektrum vibrací [10]

Tento typ nesouososti je způsoben Úhlová nesouosost způsobuje rázy v ose spojky, proto se projeví nejvíce ve spektru v axiálním směru na základní harmonické. Tyto rázy se šíří v hřídeli v axiálním směru, takže jsou měřitelné nejenom v místě vzniku, ale i v ostatních měřících bodech umístěných na stejné hřídeli.

Ukazatelem stavu úhlové nesouososti je poměr amplitudy druhé harmonické [10]:

- Do 50 % 1X Dobrý stav
- 50- 150 % 1X Problém
- Nad 150 % 1X Kritický stav

V praxi se téměř výhradně objevují oba tyto typy nesouososti současně. Jde o známku špatného usazení stroje nebo soustrojí, které se řeší většinou celkovým novým usazením stroje za použití měřicí techniky (dnes většinou laserových měřidel).

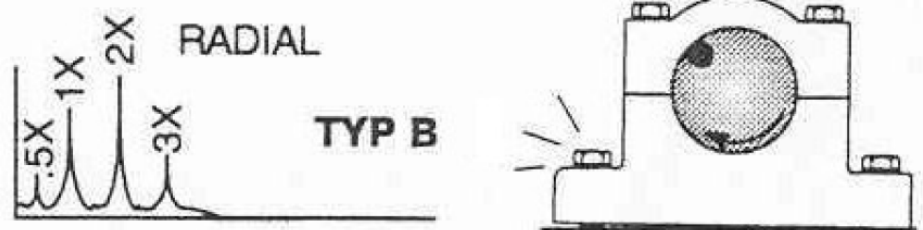
4.3.2. Mechanické uvolnění

Mechanické uvolnění je většinou způsobeno nevyhovujícím technickým stavem komponent uchycení stroje, nebo je způsobeno jejich poruchou.



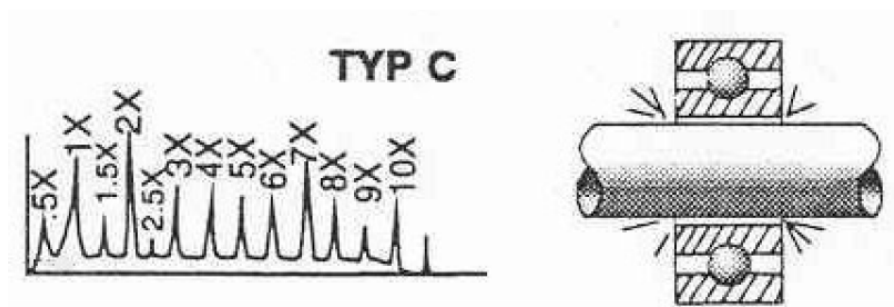
Obr. 21 Mechanické uvolnění typu A [10]

Mechanické uvolnění typu A je způsobeno nedostatečnou tuhostí základu nebo základového rámu. Pokud má základ nebo rám větší pružnost, než je potřeba, dojde ke zvýšení první harmonické ve vertikálním směru. Prověření takovéto poruchy je možno provést měřením vibrací na patce a samotném základu. Pokud jsou vibrace všude přibližně stejné, jde o mechanické uvolnění typu A. Pokud však vibrace na základu nejsou stejné jako na patce, může jít o tzv. měkkou patku. Příčinou takovéto poruchy může být uvolnění základových šroubů a armatur v betonu nebo uvolnění základových kotev. Primární příčinou však může být, zvláště u větších amplitud základní harmonické, nevyvážení rotačních částí a poškození základu může být až sekundární důsledek nevyvážení.



Obr. 22 Mechanické uvolnění typu B [10]

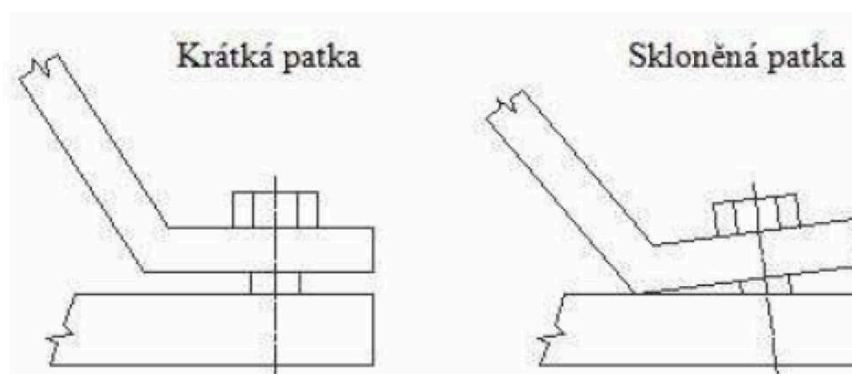
Mechanické uvolnění typu B se projevuje v případě uvolnění ložiskového stojanu nebo trhliny v základovém rámu. Takovéto poškození neprojevuje zejména na frekvenci druhé harmonické otáčkové frekvence.



Obr. 23 Mechanické uvolnění typu C [10]

Mechanické uvolnění typu C je způsobeno vůlemi v ložiscích nebo uvolněnou spojkou na hřídeli. Obecně tato porucha způsobí zvýšení šumu, což se ve spektru projeví jako velké množství harmonických včetně subharmonických složek, které se v čase mění.

Obecně platí, že veškeré projevy mechanického uvolnění mají původ v nevyvážení, excentricitě, poškození ložisek nebo jiné poruše, která je zdrojem vibrací. Mechanické uvolnění tyto vibrace pouze harmonicky zkresluje, ale není původcem. Uvolnění však může být přímým důsledkem těchto vibrací. Při pravidelně a správně prováděné diagnostice vibrací dojde k odhalení primární příčiny vibrací ještě dříve, než jejich vlivem dojde k uvolnění nebo poškození součástí zařízení.

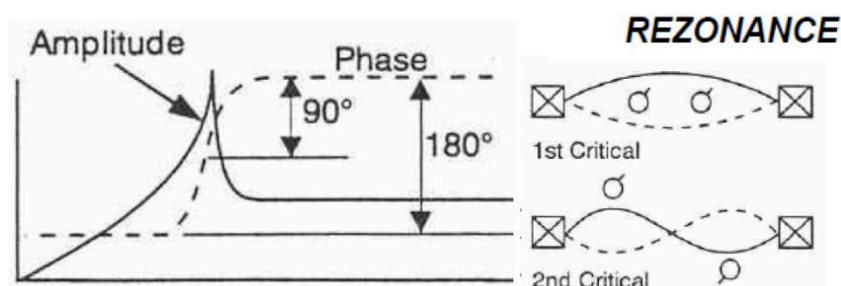


Obr. 24 Uchycení projevující se jako měkká patka [10]

Pokud jsou vibrace měřitelné na stroji ale ne na základovém rámu, jde nejspíše o některý z případů tzv. měkké patky. Tento případ není způsoben poškozením, ale jde o nesprávnou montáž nebo může jít o chybnou konstrukci patek či základu. Jak je uvedeno na Obr. 24 nedochází v případě měkké patky k plošnému kontaktu patky stroje se základovým rámem. V takovém případě není zajištěna dostatečná tuhost tohoto uložení a vibrace se mohou šířit celým strojem.

4.3.3. Rezonance

Mechanická rezonance strojních zařízení nastává, když je vnucená frekvence vibrací zesílена součástí stroje, která má vlastní frekvenci shodnou nebo hodně blízkou vnucené frekvenci. Při rezonanci dojde ke zvýraznění základní harmonické. Diagnostikovat rezonanci ve spektru není jednoduché, protože její projevy jsou shodné s nevyvážením. Proto se zaměří pozornost na rezonanci až ve chvíli, když nelze stroj opakovaně vyvážit. Rezonance se taktéž projevuje vysokou směrovností vibrací. Pokud ve spektru není větší množství vyšších harmonických, lze rezonanci rozeznat podle typického tvaru rezonanční špičky ve spojitém spektru:



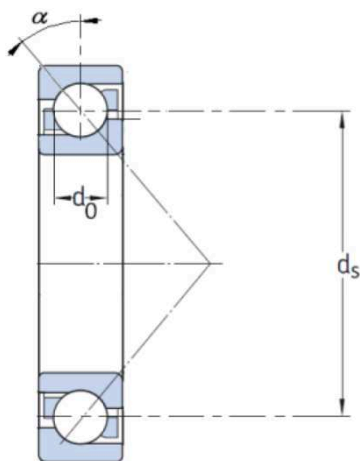
Obr. 25 Typický tvar rezonanční špičky [10]

Rezonanci lze potlačit několika způsoby [10]:

- Změnou vlastní frekvence změnou tuhosti
- Změnou vlastní frekvence změnou hmotnosti
- Mechanickou izolací vibrací od rezonujících částí
- Přesné dynamické vyvážení

4.3.4. Poruchy ložisek

Poruchy ložisek se pomocí spektra vibrací diagnostikují nejčastěji pro valivá ložiska. Poruchy kluzných ložisek kromě mechanického uvolnění typu C nelze spektrální analýzou diagnostikovat.



Obr. 26 Základní rozměry ložiska [10]

c- počet valivých elementů

Frekvence při poškození vnějšího kroužku [10]:

$$f = \frac{c}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left[\left(1 - \frac{d_0}{d_s} \right) \cos \alpha \right] \quad (18)$$

Frekvence při poškození vnitřního kroužku [10]:

$$f = \frac{c}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left[\left(1 + \frac{d_0}{d_s} \right) \cos \alpha \right] \quad (19)$$

Frekvence při poškození valivého elementu [10]:

$$f = \frac{d_s}{2d_0} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left[\left(1 - \left(\frac{d_0}{d_s} \right)^2 \right) \cos^2 \alpha \right] \quad (20)$$

Pro válečková ložiska platí totožné rovnice, pouze úhel dotyku $\alpha=0$ rad. Valivá ložiska při poškození prochází různými stádii vývoje poškození. Při poškození jakékoliv části totiž postupně dochází vlivem vnitřních rázů k poškozování ostatních součástí a tak se poškození šíří a zhoršuje. Pokud není porucha ložiska včas odstraněna, může dojít až k fatálnímu selhání ložiska (např. k roztržení kroužku).

4.3.5. Elektrické poruchy

Při diagnostice elektrických poruch je potřeba ze spektra nejprve vyloučit frekvence, které jsou způsobeny konstrukcí motoru, především pak frekvenci drážkování statoru:

$$f = f_{ot} \cdot Q \quad (21)$$

U synchronního stroje jsou elektrické poruchy diagnostikovány pomocí elektrických měření. Pomocí vibrací lze diagnostikovat pouze problémy se vzduchovou mezerou, nebo s nesymetrií magnetického pole.

Nesoustřednost statoru a rotoru, nebo poruchy statorového vinutí se projevuje jako radiální vibrace o frekvenci dvojnásobku síťového kmitočtu (vždy 2 cívkové strany na pól a fázi).

$$f = 2f_s \quad (22)$$

Tyto vibrace jsou silně směrové, protože je nesymetrie pole vázána mechanicky na stator.

Elektrickou příčinou vibrací mohou být ložiskové proudy. Tyto vibrace však jsou dány poškozením ložisek těmito proudy, nikoli samotnými proudy.

4.4. Měření hluku

Každý elektrický točivý stoj při svém provozu produkuje do určité míry hluk, který můžeme několik zdrojů:

- Magnetostrikce v magnetickém obvodu
- Uvolnění nebo nedokonalost stažení paketu
- Ventilátor
- Ložiska

Hluk má negativní vliv na lidský organismus, a to jak při krátkodobém působení vysoké hladiny hluku, tak při dlouhodobém působení nízké hladiny hluku. Hluk může způsobovat nejen poškození sluchových orgánů, ale i poruchy spánku nebo psychické problémy.

Hluk elektrických strojů se měří vždy za provozu v daném místě, a to především z důvodů dodržování hygienických norem. Jako doplňující výstup těchto měření však může být indikace nastalého problému ve stroji, pokud se hladina hluku skokově zvýší.

Hluk elektrických strojů se měří za použití váhového filtru A zpravidla v referenční vzdálenosti 1m od obvodu stroje. Hladina akustického tlaku pak je [22]:

$$L_A = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_i + K_{Ai})} \quad (23)$$

Korekční koeficient K_{Ai} pro i-té pásmo stanovuje norma:

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| f [Hz] | 16 | 31.5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 16k |
| K_A [dB] | -56,7 | -39,4 | -26,2 | -16,1 | -8,6 | -3,2 | 0,0 | +1,2 | +1,0 | -1,1 | -6,6 |

Tab. 6 Korekční koeficienty pásem pro váhový filtr A [23]

Tento postup výpočtu akustického tlaku částečně kompenzuje nelinearitu lidského ucha tak, aby hladina akustického tlaku odpovídala sluchovému vjemu. Pro diagnostiku poruchy stroje však je tento postup spíše na obtíž. Při měření hluku pro hygienické účely se však tyto váhové filtry používají, proto je při vyhodnocování těchto hodnot potřeba vzít v úvahu, že měřená hodnota akustického tlaku je silně nelineární.

4.5.Diagnostika magnetického obvodu

Porucha magnetického obvodu se většinou projevuje lokálním přehřátím magnetického obvodu v místě zkratovaných plechů nebo jiných problémů. Při běžném provozu nelze online diagnostikou takovouto závadu rozpoznat; pouze při poruše velkého rozsahu by se projevil zvýšené vibrace stroje.

4.5.1. Magnetizační zkouška

Magnetizační zkouška je jednou ze základních zkoušek před uvedením stroje do provozu. Provádí se rovněž vždy, když je při opravě proveden zásah do magnetického obvodu. Magnetizační zkouška se provádí proudem o síťové frekvenci a délku zkoušky stanovuje norma, nebo může být podle přání zákazníka provedena po delší dobu.

Pokud se v magnetickém obvodu objeví místa, kde došlo ke zkratování plechů a místo se přehřívá je potřeba v tomto místě plechy oddělit a opětovně odizolovat pomocí izolačního papíru nebo v případě větších poruch celý paket rozebrat a izolaci plechů kompletně opravit.

5. Realizace diagnostického měření

Parametry diagnostikovaného motoru

ČKD PRAHA

| | | | | | | | | | |
|------------|------|-----------|------|-------|-------|------|---------------|------|-------|
| SYNCHRONNÍ | | MOTOR | | 3 | ~ | TYP | 1EB 100-50-4Z | | |
| KRYTÍ | IP44 | | TVAR | M722K | | ČÍS. | 127 059 | | |
| 900 | | kW | | | | kVA | S1 | | |
| 50 | Hz | cosφ | 0,9 | | | | kVA | 1500 | 1/min |
| SPOJ. | Y | | 6000 | | | V | 103 | | A |
| BUZ. | | | 45 | | | V | 190 | | A |
| CHLAZENÍ | | ICW 37A81 | | | IZOL. | B | 4810 | | |
| | | | | | | 1979 | ČSN 350200 | | |

Obr. 27 Tovární štítek diagnostikovaného motoru

Další parametry:

Počet drážek: $Q=72$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{72}{4 \cdot 3} = 6 \quad (24)$$

Rotor stroje je uložen na kluzných ložiscích s tlakovým mazáním. Motor je chlazen vzduchem v uzavřeném oběhu, přes výměník vzduch- voda. Chladicí vzduch je hnán vlastními ventilátory na koncích rotoru a studený vzduch se vrací přes dělený paket a prochází mezi póly rotoru. Motor je součástí soustrojí motor- převodovka- turbokompresor.

Rotor není vybaven amortizéry ani kruhy nakrátko, proto je autosynchronní rozběh proveden přímo zkratovaným budícím vinutím. Motor je spouštěn přímým připojením k síti. Při rozběhu je pro minimalizaci zatěžovacího momentu uzavřené sání turbokompresoru a po nabuzení a synchronizaci stroje se sání kompresoru otevře a tím dojde k zatížení motoru.

Parametry převodovky:

Převodový poměr $i= 8,97$

Otáčky motoru $n_1= 1500 \text{ min}^{-1}$

Otáčky kompresoru: $n_2= 11960 \text{ min}^{-1}$

5.1.Offline diagnostika

5.1.1. Vizuální prohlídka

Stroj byl rozebrán a odvezen do elektrotechnických dílen společnosti Strojírny a stavby Třinec a.s., kde byl podroben prohlídkám, měření a opravám.

Prohlídka statoru:

Statorový paket je nepoškozený ani mechanicky, ani tepelně. Ochranný lak je v pořádku. Drážkové klíny jsou všechny na svém místě a jsou tuhé. Rozpěrky v dělicích mezerách rotorového paketu jsou všechny na místě a jsou pevné. Rozpěrné palce čel vinutí jsou kompletní a pevně zalepeny mezi cívkami. Samotné vinutí nemá v drážkách znatelnou vůli a vzhledem k tomu, že je celý paket nastříkán lakem a všechny drážkové klíny jsou na místě, není možné provést kontrolu vůle bočních klínů měrkou.

Na povrchu vinutí i paketu je usazen mastný prach spolu s mosaznými pilinami z kroužků. Tento prach je soustředěn především na začátcích vinutí, kde byly při provozu elektrostaticky přitahovány. Tyto nečistoty zhoršují izolační stav motoru v místě, kde je nejvíce ohrožen, tedy v místě nejvyššího napětí ve stroji. Tento prach je potřeba v rámci střední opravy odstranit a pokud možno celý paket přestříkat ochranným lakem.

Teplotní čidla nejsou v drážkách ani v čelech instalovány (původní čidla byly již dříve demontovány).

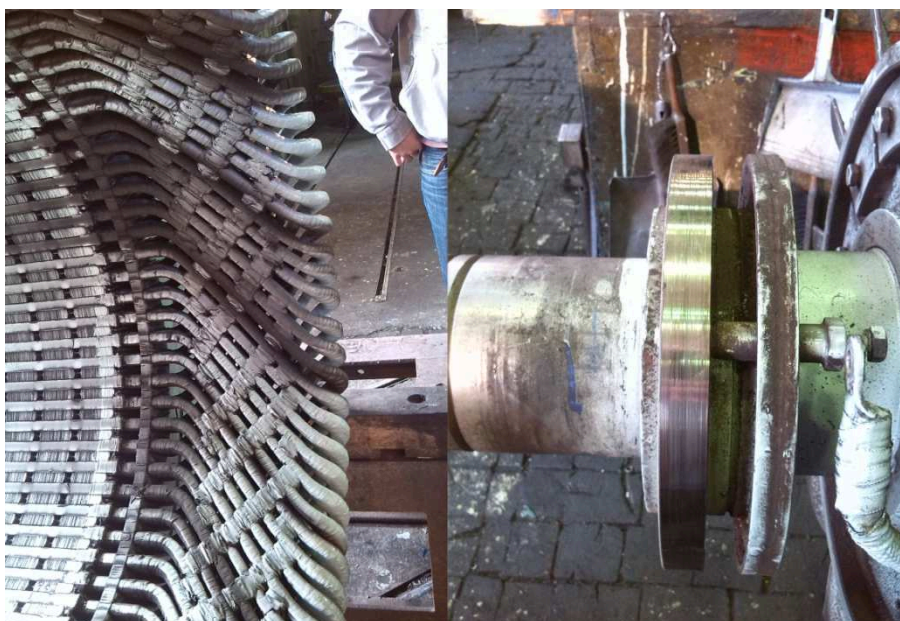
Prohlídka rotoru:

Rotor není mechanicky ani tepelně poškozen. Budící vinutí je lehce znečištěno prachem. Přívody budícího vinutí jsou pevně přichyceny ke hřídeli. Nalisování kabelových koncovek a jejich izolace je v pořádku. Kontrola dotažení svorek na kroužcích se provede až po soustružení nebo výměně kroužků.

Dosedací plochy hřídele jsou čisté a nenesou známky poškození. Zajišťovací podložky šroubů jsou nepoškozeny na svých místech, proto není potřeba dotáhnutí a opětovné zajištění pólových nástavců, ani rozpěrných klínů mezi budícím vinutím. Vyvažovací závaží jsou na svých místech a jsou dotažena. Ventilátor není viditelně poškozen.

Kroužky vykazují výrazné opotřebení, které již překračuje dovolený úbytek materiálu. Zápich na kraji kroužků již není znatelný, proto je potřeba kroužky vyměnit.

Hodnocení: nevyhovuje (nadměrné opotřebení kroužků)



Obr. 28 Čelo vinutí a rotorový kroužek

5.1.2. Odpor vinutí

Vzhledem k tomu, že vinutí jednotlivých fází nelze rozpojit, protože jsou spojeny do hvězdy přímo ve vinutí, byl měřen odpor i všechny ostatní veličiny přímo na tomto pospojovaném vinutí na napájecích svorkách. Na motoru byl měřen odpor pomocí čtyřvodičového zapojení ohmmetru pro měření malých odporů.

Použitý měřicí přístroj:

MMR 620

v.č. 322000

Kalibrační list: 094203/12 (LBV)

Byly změřeny hodnoty odporu vinutí:

U-V 551 mΩ

V-W 550 mΩ

U-W 551mΩ

Naměřené hodnoty nevykazují nijak významnou odchylku, proto lze konstatovat, že vinutí všech fází jsou ve stejném stavu a s největší pravděpodobností není ani u jednoho žádná porucha vodivých cest. Lze tedy vyloučit například přechodový odpor nebo studený spoj ve vinutí.

Hodnocení: vyhovuje

5.1.3. Kapacita vinutí a izolační odpor statorového vinutí

Použitý měřicí přístroj:

TERAOHM 5kV

v.č.13041966

Kalibrační list: 166/13 (AKL D5 a.s.)

Pro srovnání změny parametrů stroje byly změřeny hodnoty izolačního odporu před a po opravě:

| | | |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Před opravou: | Měřicí napětí: | $U = 1095 \text{ V}$ |
| | Jednominutový izolační odpor: | $R_{iz60} = 21,3 \text{ G}\Omega$ |
| Po opravě: | Měřicí napětí: | $U = 1098 \text{ V}$ |
| | Jednominutový izolační odpor: | $R_{iz60} = 24,6 \text{ G}\Omega$ |
| | Kapacita: | $C = 27 \text{ nF}$ |

Kapacita vinutí se měří pouze pro srovnání v čase. Protože však kapacita vinutí nebyla na stroji nikdy měřena, je tato hodnota pouze měřena pro srovnání při příští údržbě stroje. Kapacita nebyla měřena před opravou, protože jde o srovnávací hodnotu pro příští měření a výchozím stavem provozu motoru je jeho stav po opravě.

Izolační odpor po jedné minutě má podle PN 00/06 rev01[3] minimální předepsanou hodnotu $2 \text{ M}\Omega$. Minimální doporučená hodnota je $200 \text{ M}\Omega$. Změřená hodnota $24,6 \text{ G}\Omega$ je zcela vyhovující. Statorová izolace stroje je ve výborném stavu.

$$R_{iz60} = 24,6 \text{ G}\Omega > 200 \text{ M}\Omega$$

Hodnocení: vyhovuje

5.1.4. Izolační odpor rotorového vinutí

Použitý měřicí přístroj:

PU 187.1

v.č. 13893016

Kalibrační list: 312/12 (AKL D5 a.s.)

Vzhledem k tomu, že je budící vinutí konstruováno na budící napětí 45 V, byl jednominutový izolační odpor měřen napětím 100 V. Izolační odpor byl měřen na kompletním rotoru s připojenými kroužky. Podstatný je především izolační odpor po opravě.

Před opravou: Jednominutový izolační odpor: $R_{iz60} = 1,4 \text{ G}\Omega$

Po opravě: Jednominutový izolační odpor: $R_{iz60} = 1,8 \text{ G}\Omega$

Změřený jednominutový izolační odpor je ve všech případech větší, než podle PN 00/06 rev01[3] minimální doporučená hodnota $0,5 \text{ M}\Omega$. Rotorové vinutí z hlediska izolačního odporu zcela vyhovuje.

$$R_{iz60} = 1,8 \text{ G}\Omega > 0,5 \text{ M}\Omega$$

Hodnocení: vyhovuje

5.1.5. Polarizační index

Použitý měřicí přístroj:

TERAOHM 5kV

v.č. 13041966

Kalibrační list: 166/13 (AKL D5 a.s.)

U motoru byly po opravě naměřeny tyto hodnoty:

Izolační odpor: V čase 15s: $R_{iz15} = 22,7 \text{ G}\Omega$

V čase 1min: $R_{iz60} = 24,6 \text{ G}\Omega$

V čase 10min: $R_{iz600} = 96,8 \text{ G}\Omega$

Jednominutový a desetiminutový polarizační index se pak vypočte:

$$p_{iz60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} = \frac{24,6}{22,7} = 1,08 \quad (25)$$

$$p_{iz600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} = \frac{96,8}{24,6} = 3,6 \quad (26)$$

Pro jednominutový polarizační index doporučuje norma PN 00/06 rev01[3] minimální hodnotu 1,5- 4. Tato norma neuvádí minimální dovolenou hodnotu, zároveň však uvádí jako podmínku vyhovění zkoušce to, že izolační odpor musí stoupat v čase. Z toho vyplývá požadovaný polarizační index větší než jedna, čemuž tento stroj vyhovuje. Vzhledem k poměrně nízké hodnotě je však potřeba tento parametr nadále sledovat.

Pro desetiminutový polarizační index je požadováno pouze, aby jeho hodnoty byla větší než hodnota jednominutového polarizačního indexu. Měřený motor těmto kritériím vyhovuje. Z pohledu polarizace izolace je stroj vyhovující, ale změřená hodnota jednominutového polarizačního indexu je pod doporučenou hodnotou a blíží se i minimální dovolené hodnotě.

$$p_{i60} > 1$$

$$p_{i600} > p_{i60}$$

Hodnocení: vyhovuje

5.1.6. Měření rázovou vlnou

Použité měřicí přístroje:

Rázový generátor PSG 204 A

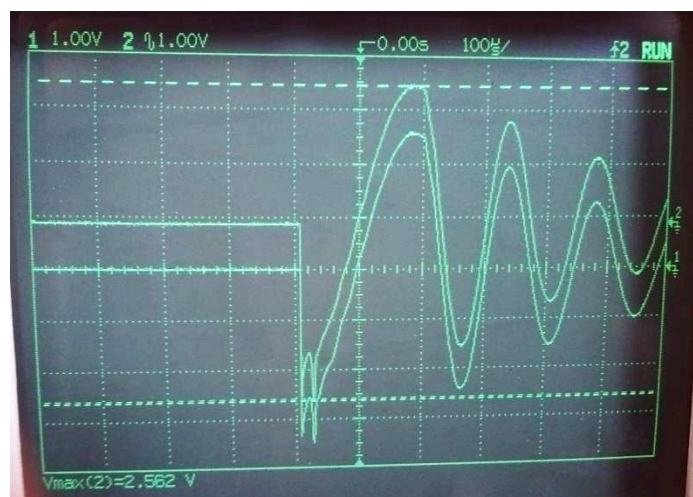
v.č. 98A 509

Osciloskop HP

v.č. 54603B

Kalibrační list sestavy: 3013- 99 (Meros)

Měřicí sestava rázového generátoru s osciloskopem provádí přímo rázovou zkoušku z obou stran vinutí najednou, proto je možné přímo na stínítku osciloskopu porovnat průběhy odrazu vlny z jednoho a druhého konce vinutí.



Obr. 29 Odraz rázové vlny

Ze změřených průběhů je patrné, že odezva na rázovou vlnu z obou konců vinutí je stejná, proto jsou vyloučeny anomálie, jako například závitový zkrat nebo poškozená mezivrstevná izolace. Pro všechny kombinace fází byly průběhy odezva na rázovou vlnu vždy shodné, proto lze konstatovat, že je vinutí v pořádku.

5.2. Online diagnostika při chodu

Online diagnostika při chodu byla provedena před odstávkou stroje z důvodu vyloučení možnosti některých zásadních závad, které by mohly být opraveny při prováděné střední opravě.

Online diagnostika byla prováděna na stroji v běžném chodu. Soustrojí bylo před zahájením měření v chodu více než hodinu, proto se všechny hodnoty dají považovat za ustálené. Měření probíhalo 4.3.2015 a získaná data lze porovnat se stejným měřením ze dne 21.1.2015.

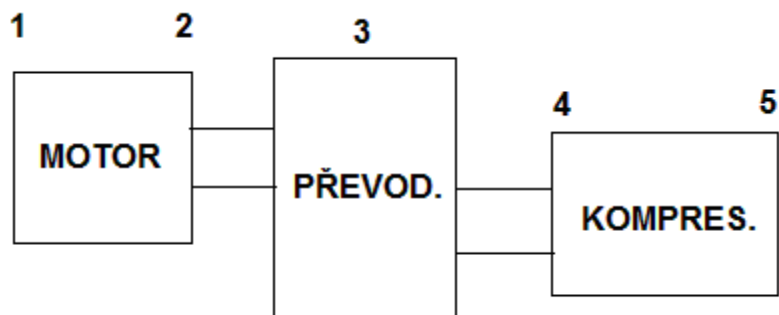
Při chodu měl motor provozní parametry:

| | |
|------------------|---------|
| Proud statoru: | 68 A |
| Napájecí napětí: | 6,26 kV |
| Budící proud: | 126 A |
| Budící napětí: | 28 V |
| Příkon: | 0,7 MW |
| Účinník sítě: | 0,95 |



Obr. 30 Měřený motor při provozu (nad motorem je výměník chlazení vzduch- voda)

5.2.1. Diagnostika vibrací:



Obr. 31 Měřicí místa soustrojí kompresoru ČKD 4

1. Přední ložisko elektromotoru
2. Zadní ložisko elektromotoru
3. Skříň převodovky
4. Přední ložisko kompresoru
5. Zadní ložisko kompresoru

Použitý měřicí přístroj:

SCHENCK Vibrotest 60

v.č.002290JR

Akcelerometr SCHENCK AS-065

v.č.0022FMEK

Vzhledem k tomu, že jde o soustrojí s převodovkou, je potřeba si určit ve spektru všechny první harmonické:

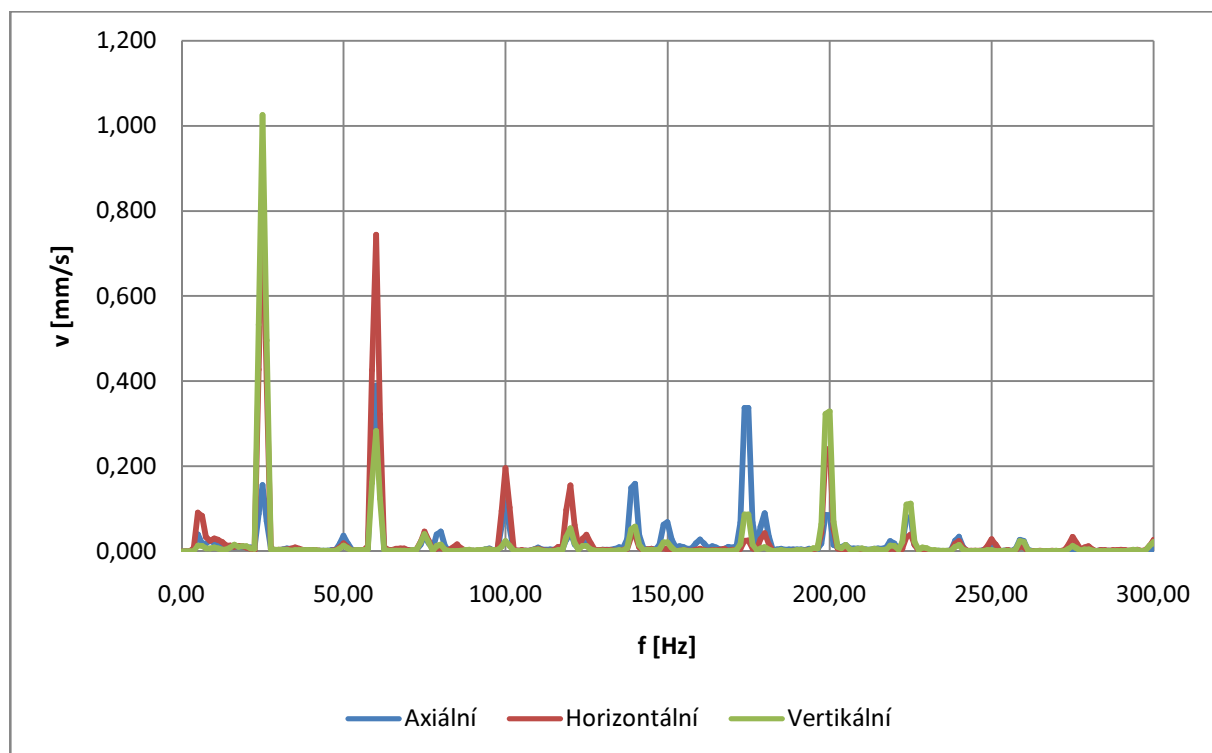
První harmonická motoru:

$$f_m = \frac{f_s}{p} = \frac{50}{2} = 25 \text{ Hz} \quad (27)$$

První harmonická turbokompresoru:

$$f_k = f_m \cdot \frac{n_2}{n_1} = 25 \cdot \frac{11960}{1500} = 199,3 \text{ Hz} \quad (28)$$

Z hlediska diagnostiky elektromotoru jako takového mají význam pouze data z měření vibrací a ložiskových stojanech elektromotoru, tedy v měřících bodech 1 a 2.



Obr. 32 Spektrum měřené na předním ložisku motoru

Ve spektru jsou patrné složky základních harmonických jak motoru, tak kompresoru. Vyšší harmonické nad otáčkovou frekvenci kompresoru mají téměř zanedbatelnou amplitudu, proto budeme uvažovat pouze frekvence pod touto frekvencí.

| f [Hz] | Harmonická- $\frac{f}{f_m}$ |
|----------|-----------------------------|
| 62,5 | 2,5 X |
| 100 | 4 X |
| 175 | 7 X |

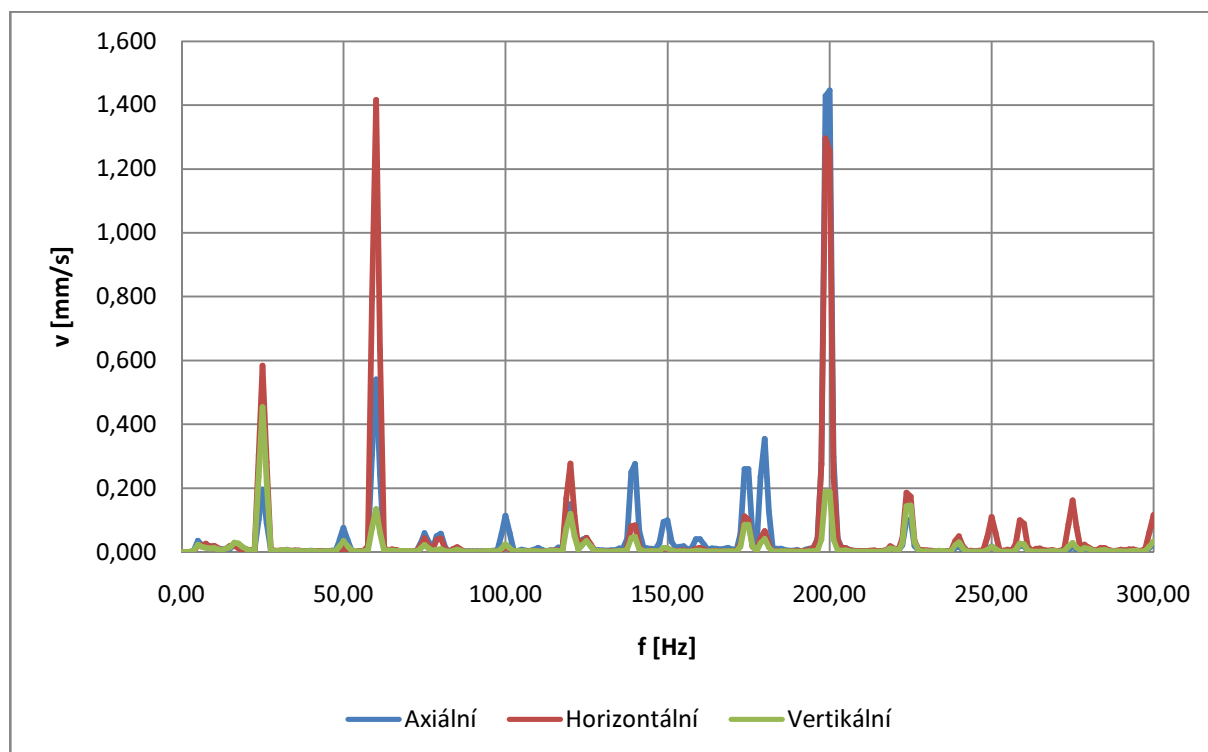
Tab.7 Harmonické složky vibrací předního ložiska

Frekvence 62,5 Hz je sice 2,5- tou harmonickou motoru, ale objevuje se jako dominantní frekvence ve spektru zadního ložiska kompresoru. Protože nejde o subharmonickou kompresoru, dá se předpokládat, že jde nejspíše o chvění vyvolané turbulencemi potrubí nebo jde o chvění z jiného zdroje mimo samotný kompresor.

Čtvrtá harmonická otáčkové frekvence motoru, tedy 100 Hz není zcela standardní, ale tyto vibrace mohou být způsobeny nesymetricky příčně proudícím chladícím vzduchem kolem pólových nástavců rotoru. To podporuje i fakt, že jsou tyto vibrace v radiální rovině silně směrové.

Neobvyklá je mírně zvýšená sedmá harmonická, což by mohlo poukazovat na mechanické uvolnění typu C v ložiscích. Vzhledem k tomu, že jde o kluzná ložiska s tlakovým mazáním, dá se taková minimální vůle vlivem opotřebení v době před plánovanou opravou předpokládat.

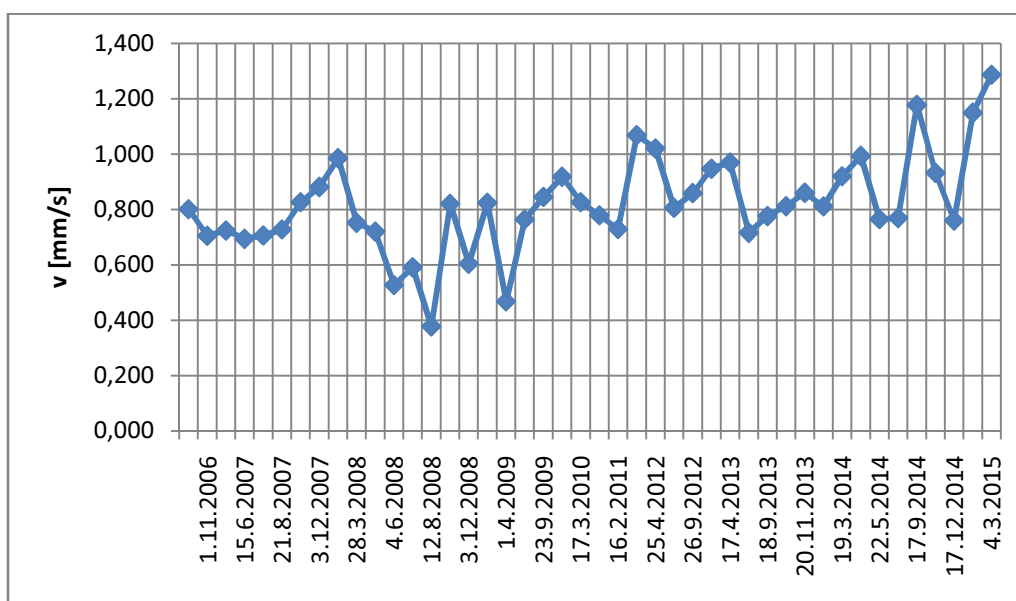
Ve spektru se objevují i frekvence 120 Hz a 140 Hz, které nejsou harmonickými otáčkové frekvence motoru ani subharmonickými frekvence kompresoru. Jelikož se frekvence 120 Hz objevuje i ve spektru měření vibrací převodovky, jde nejspíše o otáčkovou frekvenci převodového mezistupně v převodovce. Protože jiná frekvence již nevykazuje obdobné známky, co se týče lokalizace, jde nejspíše o dvojstupňovou převodovku.



Obr. 33 Spektrum měřené na zadním ložisku motoru

Ve spektru měřeném na zadním ložisku se mnohem více projevuje základní harmonická kompresoru. Opět se objevují frekvence 62,5 Hz, 120 Hz, 140 Hz. Na zadním ložisku se však objevuje frekvence 180 Hz. Vzhledem k tomu, že je výrazně větší v axiálním směru, jde nejspíše o frekvenci, která se šíří z převodovky nebo z kompresoru.

Kromě spektra vibrací se používá tentýž záznam měření k vyhodnocení efektivní hodnoty vibrací jako srovnávacího parametru vývoje stavu zařízení. Měření efektivní hodnoty vibrací se provádí již dlouhou dobu, proto je možné v případě odchylek určit, zda se jedná o běžný stav, nebo jde o poruchu.



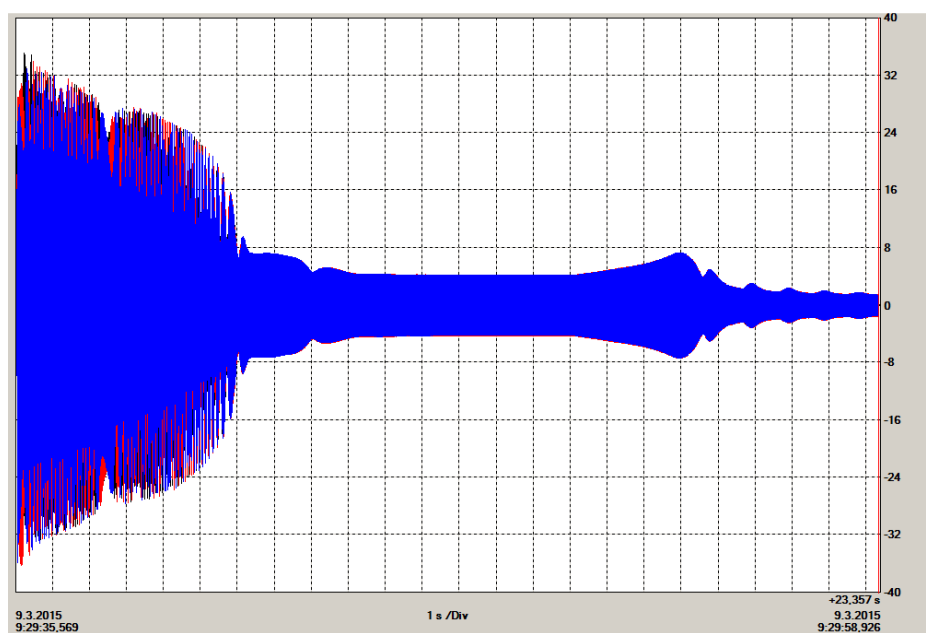
Obr. 34 Trend vývoje efektivní hodnoty horizontálních vibrací předního ložiska motoru

Na základě sběru historických dat lze, s určitou mírou spolehlivosti, provádět prognostiku a stanovit tak plán odstávek a oprav.

Hodnocení: vyhovuje

5.3. Online diagnostika při rozběhu

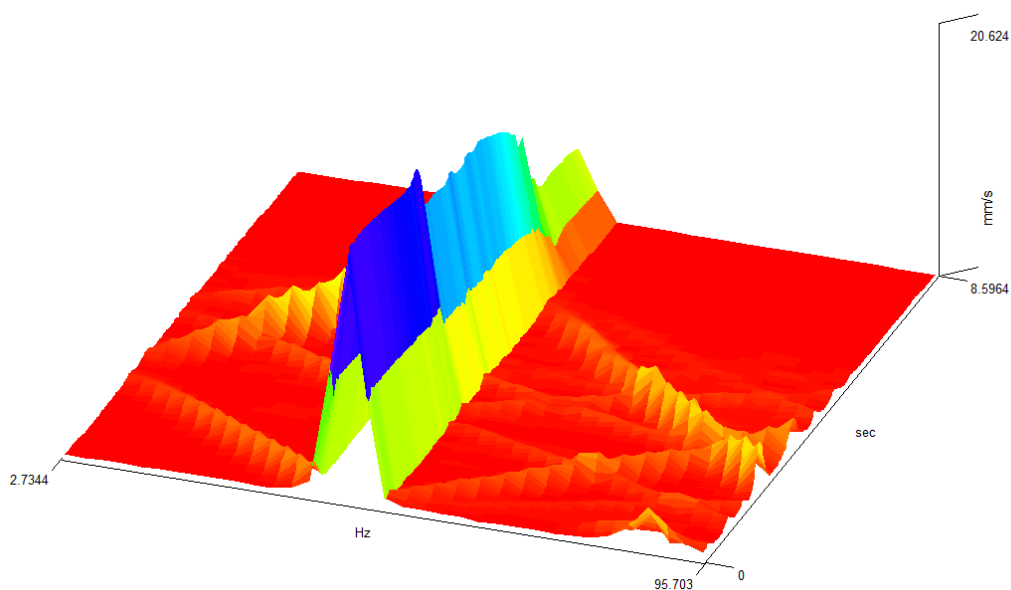
Průběh efektivní hodnoty proudu při rozběhu může vypovídat hodně o provozních stavech stroje při rozběhu a při následném zatížení. Takovéto měření neslouží k diagnostice samotného stroje, ale spíše k analýze provozních stavů, doby rozběhu a posouzení dynamiky celého systému.



Obr. 35 Průběh proudu při rozběhu motoru

U konce rozběhu jsou dobře zřetelné poslední 3 překmity napájecího proudu před vtažením do synchronizmu. Na konci měřeného průběhu dojde k zatížení motoru turbokompresorem a je zde patrná dynamická odezva na změnu zatížení. Dochází zde ke kývání rotoru a to s periodou přibližně 1,1 s.

Harmonickou analýzou rozběhového proudu lze diagnostikovat v oblasti před vtažením do synchronizmu především poruchy klece nakrátko podobně jako u asynchronního motoru.



Obr. 36 Časový rozvoj spektra při rozběhu

Z provedeného záznamu rozběhového proudu lze vykreslit časový rozvoj spektra v průběhu rozběhu (například pomocí programu Sigview). V případě, že by motor byl vybaven amortizéry s poruchou tyče, bylo by možné vidět v průběhu rozběhu výrazné postranní harmonické, které by se s klesajícím skluzem a rostoucími otáčkami blížily k základní harmonické. To, co je patrné na obr. 36, je nejspíše pouze vliv rozdílu podélné a příčné reaktance rotoru.

6. Vyhodnocení měření

Jedinou vážnější závadou diagnostikovaného stroje je nevyhovující stav rotorových kroužků, které je potřeba vyměnit a přesoustružit. V rámci diagnostiky izolačního systému byl stroj shledán vyhovujícím. Jednominutový polarizační index statorového vinutí není v mezích doporučených hodnot, ale vyhovuje dovozeným hodnotám. Celkový stav izolačního systému je jinak elektricky i vizuálně dobrý.

Vzhledem k tomu, že během opravy nebyl nutný zásah do vinutí, nebyla nutnost provádět před zpětnou montáží napěťovou zkoušku vinutí. Nebyl nutný ani zásah do statorového paketu, proto se magnetizační zkouška rovněž neprováděla.

V rámci pravidelné střední opravy se na stroji provedla údržba, zahrnující očištění nečistot ze statoru i rotoru a přestříkání novým emailovým epoxysterovým izolačním lakem (S2352/0101). V rámci měření izolačního odporu je vidět mírné zlepšení, především díky odstranění prachu spolu se zbytky pilin vybroušených z kroužků. Musely být vyměněny nadměrně opotřebené kroužky a byly kvůli vyvážení a symetrii přesoustruženy. Bylo provedeno dotažení všech spojovacích šroubů i elektrických spojů, které nebyly opatřeny zajišťovací podložkou. Rotor byl znovu vyvážen a celý stroj bude znovu nově usazen do ložisek. Po zpětné montáži bude provedena opětovná diagnostika vibrací celého soustrojí.

Tento motor může být po opravě vyhodnocen jako vyhovující a v takovémto stavu může být provozován bez jakéhokoli omezení nebo opatření.

Celkové hodnocení po opravě: vyhovuje

7. Doporučení

Pro další provoz stroje doporučuji vzhledem k jeho stáří zavést pravidelné měření izolačních odporů a polarizačních indexů nad rámec požadovaný normou. Pro lepší informace o stavu izolace bych doporučil zavést pravidelné měření ztrátového činitele $\tan \delta$, který je lepším ukazatelem stavu izolace, než je izolační odpor a polarizační index, protože není tolik ovlivňován momentálními podmínkami při měření.

Během měření byla zjištěna frekvence vibrací na frekvenci 62,5 Hz pocházejícího s největší pravděpodobností ze zdroje mimo samotné soustrojí. I když celkové vibrace jsou v normálu, doporučuji zdroj těchto vibrací lokalizovat, aby bylo možné s jistotou říci, že se nejedná o projev poruchy. Tyto vibrace, i když nejsou velké, negativně ovlivňují soustrojí a pokud by existovala jednoduchá a levná možnost jejich eliminace, mohlo by to vést k prodloužení životnosti soustrojí.

8. Závěr

Tato diplomová práce shrnuje základní principy funkce synchronního stroje a možnosti provádění diagnostiky na synchronních strojích. Problematika diagnostiky spočívá v určení jednoznačných kritérií, metod měření a praktického významu provádění takovýchto měření.

Praktický význam provádění diagnostiky spočívá v prodloužení životnosti a spolehlivosti strojů, které jsou pro daný provoz důležité. Hlavním důvodem provádění diagnostických zkoušek a měření je tedy ekonomická úspora v dlouhodobém časovém horizontu.

Jak je z obsahu této práce zřejmé, hlavní součástí, kterou je potřeba diagnosticky sledovat je izolace, protože je prvkem elektrických strojů, který podléhá nejrychlejší degradaci.

Tato diplomová práce by měla sloužit jako přehled možností běžně dostupných diagnostických metod včetně praktického měření a vyvození příslušných závěrů. Provedené měření a postup vyhodnocení jednotlivých měřených veličin a parametrů může být použit jako podklad pro praktické provádění vyhodnocování diagnostiky v praxi.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 1 Náhradní schéma synchronního stroje [6]</i> | 17 |
| <i>Obr. 2 Moment synchronního stroje s hladkým rotorem [6]</i> | 18 |
| <i>Obr. 3 Moment synchronního stroje s vyniklými póly [13]</i> | 20 |
| <i>Obr. 4 Reluktanční rotor vyrobený z rotoru asynchronního stroje [13]</i> | 21 |
| <i>Obr. 5 Provedení rotoru čtyřpólového reluktančního motoručerpadla s účinností IE4 [12]</i> | 21 |
| <i>Obr. 6 Amortizéry stroje s vyniklými póly a spojení amortizérů kruhy nakrátko [14;15]</i> | 22 |
| <i>Obr. 7 Vtažení do synchronizmu [16]</i> | 24 |
| <i>Obr. 8 Zapojení pro rozběh motoru 4,25 MW</i> | 24 |
| <i>Obr. 9 Vytvoření permutované(Roeblovy) tyče [17]</i> | 25 |
| <i>Obr. 10 Drážkování hladkého rotoru a rozložení magnetické indukce [13]</i> | 26 |
| <i>Obr. 11 Tvar pólového nástavce stroje s vyniklými póly [6]</i> | 27 |
| <i>Obr. 12 Magnetizační charakteristika orientovaného plechu v různých směrech magnetizace [19]</i> ... | 28 |
| <i>Obr. 13 Význam technické diagnostiky [18]</i> | 32 |
| <i>Obr. 14Fázorový diagram reálného dielektrika [17]</i> | 37 |
| <i>Obr. 15 Průběh složek proudů po připojení dielektrika ke stejnosměrnému proudu [4]</i> | 38 |
| <i>Obr. 16 Měření izolačního odporu s rozpojitelným uzlem a s nerozpojitelným uzlem[21]</i> | 39 |
| <i>Obr. 17 Paralelní náhradní schéma a fázorový diagram izolace pro výpočet $\text{tg}\delta$</i> | 41 |
| <i>Obr. 18 Zapojení pro měření částečných výbojů (MČV- měřič částečných výbojů)[21]</i> | 43 |
| <i>Obr. 19 Paralelní nesouosost a spektrum vibrací [10]</i> | 47 |
| <i>Obr. 20 Úhlová nesouosost a spektrum vibrací [10]</i> | 47 |
| <i>Obr. 21 Mechanické uvolnění typu A [10]</i> | 48 |
| <i>Obr. 22 Mechanické uvolnění typu B [10]</i> | 49 |
| <i>Obr. 23Mechanické uvolnění typu C [10]</i> | 49 |
| <i>Obr. 24 Uchycení projevující se jako měkká patka [10]</i> | 50 |
| <i>Obr. 25 Typický tvar rezonanční špičky [10]</i> | 50 |
| <i>Obr. 26 Základní rozměry ložiska [10]</i> | 51 |
| <i>Obr. 27 Tovární štítek diagnostikovaného motoru</i> | 55 |
| <i>Obr. 28 Čelo vinutí a rotorový kroužek</i> | 57 |
| <i>Obr. 29 Odraz rázové vlny</i> | 61 |
| <i>Obr. 30 Měřený motor při provozu (nad motorem je výměník chlazení vzduch- voda)</i> | 62 |
| <i>Obr. 31 Měřící místa soustrojí kompresoru ČKD 4</i> | 63 |
| <i>Obr. 32 Spektrum měřené na předním ložisku motoru</i> | 64 |
| <i>Obr. 33 Spektrum měřené na zadním ložisku motoru</i> | 65 |
| <i>Obr. 34Trend vývoje efektivní hodnoty horizontálních vibrací předního ložiska motoru</i> | 66 |
| <i>Obr. 35 Průběh proudu při rozběhu motoru</i> | 67 |
| <i>Obr. 36 Časový rozvoj spektra při rozběhu</i> | 68 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| <i>Tab. 1 Teplotní třídy izolace podle ČSN EN 60085 [11]</i> | 29 |
| <i>Tab. 2 Mezní a doporučené hodnoty izolačního odporu a polarizačního indexu pro stator[3]</i> | 39 |
| <i>Tab. 3 Mezní a doporučené hodnoty izolačního odporu a polarizačního indexu pro rotor [3]</i> | 40 |
| <i>Tab. 4 Mezní a doporučené hodnoty kapacity, ztrátového činitele a časové konstanty pro stator [3]</i> | 42 |
| <i>Tab. 5 Kritéria vyhovění zkoušce částečných výbojů [3]</i> | 44 |
| <i>Tab. 6 Korekční koeficienty pásem pro váhový filtr A [23]</i> | 53 |
| <i>Tab.7 Harmonické složky vibrací předního ložiska</i> | 64 |

Rejstřík

- akustická sonda, 45
- akustický tlak, 54
- amortizér, 22
- asynchronní rozběh, 23
- autosynchronní rozběh, 23, 56
- autotransformátor, 24
- axiální směr, 46
- bandáže, 37
- budící systémy, 28
- budící vinutí, 27, 60
- Curieova teplota, 29
- časová konstanta, 44
- časový rozvoj spektra, 69
- částečné výboje, 44
- čtyřvodičové zapojení ohmmetru, 58
- dielektrické ztráty, 38
- dynamoplechy, 29
- efektivní hodnota vibrací, 67
- Energetika Třinec a.s., 14
- FFT analýza, 47
- fourierova analýza, 46
- frekvence drážkování statoru, 53
- hornopropustní filtr, 44
- ideální dielektrikum, 38
- izolační odpor, 39, 59
- Jouleovy ztráty, 38
- kapacita vinutí, 42, 59
- kluzná ložiska, 37, 52
- kroužky, 32, 37
- kruhy nakrátko, 22
- kývání rotoru, 68
- ložiskové proudy, 53
- magnetostrikce, 54
- mechanické uvolnění, 49
- měkká patka, 51
- moment stroje s hladkým rotorem, 18
- Moment stroje s vyniklými póly, 19
- moment synchronního stroje, 18
- momentová charakteristika, 18, 20
- neorientované plechy, 29
- nevyváha, 48
- offline diagnostika, 34
- Ohmův zákon, 40
- online diagnostika, 33
- orientované plechy, 29
- osciloskop, 61
- paralelní nesouosost, 48
- Permutovaná tyč, 26
- počet pólpárů, 17
- podbuzený generátor, 23
- podbuzený motor, 23
- podélná reaktance, 18, 69
- polarizační index, 40, 60
- pouzdro ložiska, 46
- přebuzený motor, 23
- převodovka, 56, 64
- příčná reaktance, 18, 69
- radiální směr, 46
- rázová vlna, 61
- reakční moment, 18
- reluktanční motor, 21
- ResinRich, 31
- Roeblova tyč, 26
- rotorové vinutí, 27
- samobuzení, 23
- spektrální analýza, 46
- statorový paket, 37
- stroj s hladkým rotorem, 18
- Strojírny a stavby Třinec a.s., 57
- synchronní moment, 18
- synchronní otáčky, 17
- technická diagnostika, 33
- třída izolace, 30
- třída účinnosti IE2, 21
- turbokompresor, 64
- turbulence, 66
- tyčové vinutí, 26
- úhlová nesouosost, 48
- ultrazvuk, 45
- únavové trhlinky, 37
- VacuumPressureImpregnation, 31
- valivá ložiska, 52
- vícevrstvé plošné izolanty, 31
- vizuální kontrola, 36
- vnucená frekvence, 51
- vtažení do synchronizmu, 24, 68
- zátěžný úhel β , 18, 22
- zdánlivý náboj, 45
- zkrat plechů, 55
- ztátové číslo, 29
- ztrátový činitel $\text{tg}\delta$, 42

Použitá literatura

- [1] Cigánek, Bauer, *Elektrické stroje a přístroje*. Brno: SNTL, 1954
- [2] Kopylov, *Stavba elektrických strojů*. Moskva: Energija, 1980, překlad Voženílek, Praha: SNTL, 1988
- [3] PN 00/06 rev01: *Profylaktika Izolačního systému strojů točivých- turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory* (podniková norma ČEZ a.s.), 2006
- [4] Doležal, *Profylaktika Izolačního systému točivých strojů, především turbogenerátorů a vn motorů*. Plzeň: ZČU Plzeň, Plzeň 2013, Bakalářská práce
- [5] Kempa, *Elektrické zkoušky v diagnostice transformátorů*. Brno: VUT Brno, 2009, Bakalářská práce
- [6] Mravec, *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha: SNTL, 1979
- [7] Mravec, *Elektrické stroje a přístroje III*. Praha: SNTL, 1986
- [8] Hora, *Regulační a budící systémy synchronních strojů*. Praha: SNTL, 1985
- [9] PN 002 rev01: *Vibrace točivých strojů* (podniková norma ČEZ a.s.), 2005
- [10] Šenkýříková, *Vibrační diagnostika trakčního motoru ve zkušebně*. Ostrava: VŠB- TUO, 2011, Diplomová práce
- [11] ČSN EN 60085: *Elektrická izolace- Tepelná kvalifikace*
- [12] KSB, Nové motory., 2014, tisková zpráva, dostupné z:

< http://www.ksb.com/ksb-cz/Zpravy/Tiskove_zpravy/2285738 >
- [13] Chmelík, *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB- TUO, 2001, Skriptum
- [14] [Online] < www.tecowestinghouse.com/images/Synch_rotor >
- [15] [Online] < <http://www.omesrl.eu/it/generatori-sincroni-photogallery> >

- [16] Stýskala, Dudek, Synchronní stroje. Ostrava: VŠB- TOU, 2007, prezentace k přednáškám, dostupné z:
- < http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/3_Synchronni%20stroje_FS.pdf >
- [17] Turek, *Točivé stroje a jejich izolační systémy*. Plzeň: ZČU Plzeň, 2013, Bakalářská práce
- [18] *Diagnostika elektrických zařízení*. Ostrava: VŠB-TUO, 2007, Syllabus předmětu diagnostika elektrických zařízení, dostupné z:
- < <http://fei1.vsb.cz/kat410> >
- [19] Havlík, *Posouzení magnetické anizotropie orientovaného křemíkového plechu*. Praha: ČVUT Praha, 2010, referát, dostupné z:
- < cvut.falconis.cz/semestr-3/mve/03-magneticka-anizotropie-2.docx >
- [20] Feld, *Posouzení magnetické anizotropie orientovaného křemíkového plechu*. Praha: ČVUT Praha, úloha měření, dostupné z:
- < http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_3.pdf >
- [21] Nagy, *Základní diagnostické ukazatele izolačních systémů*. Plzeň: ZČU Plzeň, 2011, Bakalářská práce
- [22] *Výroční zpráva společnosti Energetika Třinec a.s.* Třinec:, 2013, dostupné z:
- < http://www.etas.trz.cz/UserFiles/File/VZ_2013.pdf >
- [23] Váhová korekce zvukoměru, dostupné z:
- < <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/217-kmitocet-zvuku-vahova-korekce-zvukomeru> >